

Ray Kurzweil
A szingularitás küszöbén



Ray Kurzweil

A szingularitás küszöbén

Amikor az emberiség meghaladja a biológiát



Ad Astra
2013

[Tartalomjegyzék](#)

A fordítás az alábbi kiadás alapján készült:
Ray Kurzweil: The Singularity Is Near
Penguin Group, 2006

Szaklektor
Koronczay Dávid

Szerkesztés
Járdán Csaba

Copyright © Ray Kurzweil, 2010
First published in Great Britain in 2010 by Gollancz,
an imprint of The Orion Publishing Group Ltd.

© Ad Astra Kiadó
Hungarian translation © Ad Astra, 2013
Portréfotó © Helene Delillo
Borítókép © Csigás Gábor

Elektronikus verzió v1.0
ISBN 978-615-5229-26-8

Nébali Kft. (Ad Astra Kiadó)
1061 Budapest, Káldy Gyula utca 6. fsz. 3.
www.adastrakiado.hu
szerkesztoseg@adastrakiado.hu
06-1-445-1344

Felelős kiadó: Bakos Péter igazgató
Felelős szerkesztő: Kleinheincz Csilla
Korrektúra: Marsi Mónika, Kleinheincz Csilla
Az elektronikus kiadás műszaki szerkesztője Farkas István
A borítót tervezte Csigás Gábor

*Anyámnak, Hannah-nak,
akitől a bátorságot kaptam, hogy megkeressem a gondolatokat, amelyek segítségével bármilyen
kihívással szembenézhetek.*

Köszönetnyilvánítás

Szeretném kifejezni mélységes hálámat édesanyámnak, Hannah-nak, és édesapámnak, Fredricnek, akik feltétel nélkül támogatták korai elméleteimet és újításaimat, szabadságot biztosítva ezzel a kísérletezéshez; húgomnak, Enidnek a biztatásért; és feleségemnek, Sonyának, illetve gyermekeinknek, Ethannek és Amynek, akik az értelmet, a szeretetet és a motivációt jelentik az életemben.

Szeretnék továbbá köszönetet mondani sok tehetséges és odaadó embernek, akik segítettek ebben a bonyolult projektben:

A Viking kiadónál: szerkesztőmnak, Rick Kotnak az útmutatásért, a lelkesedésért és az értő szerkesztésért; Clare Ferrerónak, aki kiadóként mindvégig támogott; Timothy Mennelnek a kiváló korrektúráért; Bruce Giffordsnak és John Jusinónak a könyvkiadás sok apró részletének koordinálásáért; Amy Hillnek a szöveg belső dizájnjáért; Holly Watsonnak a hatékony közönségkapcsolati munkáért; Alessandra Lusardinak, Rick Kot kiváló asszisztensének; Paul Buckley-nak a letisztult és elegáns művészeti dizájnért; és Herb Thornbynak a magával ragadó borítóért.

Irodalmi ügynökömnak, Loretta Barrettnak, akinek a lelkesedése és körültekintő útmutatása nagymértékben elősegítette a projekt megvalósulását.

Dr. Terry Grossmannak, munkatársamnak és a *Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever* című könyvünk társszerzőjének, amiért tízezer e-mail-váltás és sokoldalú közös munka során segített tisztázni elméleteimet az egészség és a biotechnológia területén.

Martin Rothblattnek lelkesedéséért mindazon technológiák iránt, amelyeket ez a könyv tárgyal, és együttműködéséért a különféle technológiák kifejlesztésében a szóban forgó területeken.

Aaron Kleinernek, régi (1973 óta meglévő) üzlettársamnak, odaadásáért és együttműködéséért ebben és sok más projektben.

Amara Angelicának, aki elszántan és bölcsen vezette kutatócsoportunkat. Amara kiemelkedő szerkesztői képességeit is bevetette, hogy segítsen megfogalmazni a könyvben tárgyalt bonyolult problémákat. Kathryn Myronuknak, aki elhivatott kutatómunkájával jelentősen hozzájárult a kutatáshoz és a jegyzetekhez. Sarah Black figyelemre méltó kutatási és szerkesztési ismeretekről tett tanúbizonyságot. Nagyon nagy segítséget jelentett a kutatócsoportom: Amara Angelica, Kathryn Myronuk, Sarah Black, Daniel Pentlarge, Emily Brown, Celia Black-Brooks, Nanda Barker-Hook, Sarah Brangan, Robert Bradbury, John Tillinghast, Elizabeth Collins, Bruce Damer, Jim Rintoul, Sue Rintoul, Larry Klaes és Chris Wright. Segítségemre volt továbbá Liz Berry, Sarah Brangan, Rosemary Drinka, Linda Katz, Lisa Kirschner, Inna Nirenberg, Christopher Setzer, Joan Walsh és Beverly Zibrak.

Köszönet Laksman Franknek a leírásaim alapján készített ábrákért és képekért, illetve az egyenletek formázásáért.

Celia Black-Brooksnak vezető szerepéért a projekt felépítésében és a kommunikációban.

Phil Cohennek és Ted Coyle-nak az ötleteim megvalósításáért a lemminges illusztráción, és Helene DeLillónak a 7. fejezet elején látható, *A szingularitás küszöbén* című fotóért.

Nanda Barker-Hooknak, Emily Brownnak és Sarah Brangannek, akik segítettek a kutatási és szerkesztési folyamat kiterjedt logisztikájának kezelésében.

Ken Lindének és Matt Bridgesnek a számítógéprendszer biztosításáért, aminek köszönhetően zökkenőmentesen haladhatott a munkánk.

Denis Scutellarónak, Joan Walshnak, Maria Ellisnek és Bob Bealnek a bonyolult projekt

könyveléséért.

A KurzweilAI.net teamnek, melynek tagjai jelentős kutatási támogatást biztosítottak a projektnek: Aaron Kleinernek, Amara Angelicának, Bob Bealnek, Celia Black-Brooksnak, Daniel Pentlarge-nak, Denis Scutellarónak, Emily Brownnak, Joan Walshnek, Ken Lindének, Laksman Franknak, Maria Ellisnek, Matt Bridgesnek, Nanda Barker-Hooknak, Sarah Blacknek és Sarah Brangannak.

Mark Bizzellnek, Deborah Liebermannak, Kirsten Clausennek és Dea Eldoradónak a segítségért, amit a könyv üzenetének kommunikálásában nyújtottak.

Robert A. Freitas Jr.-nak a nanotechnológiával kapcsolatos részek alapos átnézéséért.

Paul Linsay-nek a könyv matematikai tartalmának alapos átnézéséért.

Tudóstársaimnak, akik felbecsülhetetlen szolgálatot tettek azzal, hogy gondosan ellenőrizték a tudományos állításokat: Robert A. Freitas Jr.-nak (nanotechnológia, kozmológia), Ralph Merkének (nanotechnológia), Martin Rothblatnak (biotechnológia, technológiai gyorsulás), Terry Grossmannak (egészség, orvoslás, biotechnológia), Tomaso Poggiónak (agykutatás és az agy visszafejtése), John Parmentolának (fizika, haditechnika), Dean Kamennek (technológiai fejlődés), Neil Gershenfeldnek (számítástechnika, fizika, kvantummechanika), John Gershenfeldnek (rendszertervezés), Hans Moravecnek (mesterséges intelligencia, robotika), Max Morának (technológiai gyorsulás, filozófia), Jean-Jacques E. Slotine-nek (agykutatás és kognitív tudomány), Sherry Turkle-nek (a technológia társadalmi hatásai), Seth Shostaknak (SETI, kozmológia, csillagászat), Damien Brodericknek (technológiai gyorsulás, szingularitás) és Harry George-nak (technológiai vállalkozás).

Köszönet szakértő, házon belüli olvasóimnak: Amara Angelicának, Sarah Blacknek, Kathryn Myronuknak, Nanda Barker-Hooknak, Emily Brownnak, Celia Black-Brooksnak, Aaron Kleinernek, Ken Lindének, John Chalupának és Paul Albrechtnek.

Nem szakmabeli olvasóimnak, akik remek meglátásokkal segítették a munkát: a fiamnak, Ethan Kurzweilnek és David Dalrymple-nek.

Bill Gatesnek, Eric Drexlernek és Marvin Minskynek, amiért engedélyt adtak a velük készített interjúk közzlésére a könyvben, és a beszélgetésekben megjelenő gondolataikért.

A sok-sok tudósnek és gondolkodónak, akiknek ötletei és erőfeszítései egyre növelik exponenciálisan bővülő emberi tudásbázisunkat.

A fent említett személyeknek sok ötletet és helyesbítést köszönhetek. A megmaradt hibákért kizárólag engem terhel a felelősség.

Előszó

Az eszmék ereje

„Úgy vélem, semmi sem fogható ahhoz a lázas izgalomhoz, ami akkor tölti el feltaláló szívét, amikor látja, hogy valamely agyszüleménye sikeresen megvalósul.”

*(Nikola Tesla,
a váltóáram feltalálója, 1896)*

Ötéves koromban az az ötletem támadt, hogy feltaláló leszek. Úgy hittem, a találmányok képesek megváltoztatni a világot. Amikor a többi gyerek fennhangon töprengett, hogy mi szeretne lenni, én már elégedetten nyugtáztam, tudom, hogy mi leszek. A holdrakéta, amelyet akkoriban építettem (közel egy évtizeddel azelőtt, hogy Kennedy elnök az ország ügyévé tette), nem működött. Aztán úgy nyolcéves korom körül a találmányaim kezdtek realisztikusabbak lenni, mint például a robotszínház, amelyben gépek mozgatják a díszletet és a szereplőket, vagy a virtuális baseball.

A holokaust elől menekülő szüleim, akik mindketten művészek voltak, világi, kevésbé provinciális, nem túl szigorú vallásos nevelést szántak nekem.^[1] Ennélfogva spirituális oktatásom egy unitárius templomban folyt. Hat hónapig tanulmányoztunk egy-egy vallást – eljártunk az istentiszteleteire, elolvastuk a szent könyveit, beszélgettünk a vezetőivel –, aztán folytattuk a következővel. „Sok út vezet az igazsághoz” – szolt a jelszavunk. Természetesen sok párhuzamot felfedeztem a világ vallási hagyományai között, és még az ellentmondások is megvilágosító erejűek voltak. Nyilvánvaló lett számomra, hogy az alapigazságok elég mélyek ahhoz, hogy meghaladják a látszólagos ellentmondásokat.

Nyolcéves koromban felfedeztem a Tom Swift Jr. könyvsorozatot. Mind a harminchárom könyvnek (1956-ban, amikor elkezdtem olvasni őket, még csak kilenc jelent meg) ugyanaz volt a cselekménye: Tom szörnyű helyzetbe keverte magát, amelyben az ő és a barátai, és gyakran az egész emberi faj sorsa lett a tét. Tom ilyenkor visszavonult alagsori laboratóriumába, és elgondolkodott, hogyan oldhatná meg a problémát. Ez adta a sorozat összes kötetének drámai feszültségét: milyen zseniális ötlettel áll elő Tom, hogy megmentse a világot?^{[2] [3]} A történetek tanulsága egyszerű volt: a megfelelő ötlettel még a látszólag megoldhatatlan problémák is megoldhatók.

Mindmáig meg vagyok győződve ennek az alapfilozófiának a helyességéről: mindegy, milyen nehézségekkel kerülünk szembe – üzleti, egészségi, kapcsolati problémákkal, vagy korunk nagy tudományos, társadalmi és kulturális kihívásaival –, létezik olyan ötlet, gondolat, eszme, ami lehetővé teszi, hogy felülkerekedjünk rajtuk. Mi több, meg is tudjuk találni ezt az ötletet, amikor pedig megtaláljuk, át kell ültetnünk a gyakorlatba. Ez az imperativusz formálta az életemet. Az eszmék ereje – már ez is egy eszme.

Emlékszem, körülbelül ugyanakkor, amikor a Tom Swift Jr. sorozatot olvastam, nagyapám, aki anyámmal együtt menekült el Európából, két kulcsfontosságú élménnyel tért vissza az óhazából háború utáni első hazalátogatását követően. Az egyik az volt, hogy milyen barátságosan fogadták az osztrákok és a németek, ugyanaz a két nép, amelynek szülőttei elől 1938-ban menekülnie kellett. A másik egy ritka lehetőség volt: kezébe foghatta Leonardo da Vinci néhány eredeti kéziratát. Mindkét élmény emléke nagy hatással volt rám, de az utóbbihoz többször is visszatértem. Nagyapám áhítattal mesélt az alkalomról, mintha magának Istennek a művét érinthette volna meg. Ebben a vallásban nevelkedtem: az emberi kreativitás és az eszmék hatalma tiszteletében.

1960-ban, tizenkét évesen, felfedeztem a számítógépet, és lenyűgözött a világ modellezésére és újrateremtésére való képessége. Állandóan Manhattanbe, a Canal Street-i elektronikai diszkontokba jártam (még ma is megvannak!), alkatrészeket gyűjtve saját számítógépeim megépítéséhez. Az 1960-as években elmerültem kortársaim zenei, kulturális és politikai mozgalmaiban, ám egy sokkal homályosabb divat is magával ragadott: az IBM által abban az évtizedben forgalmazott számítógépszériák, kezdve a nagy 7000-esektől (7070, 7074, 7090, 7094) egészen a kis 1620-ig, ami gyakorlatilag az első miniszámítógép volt. A gépek évente kerültek piacra, mindegyik egyre olcsóbb és egyre erősebb lett, mint az előző – ma is ismerős ez a jelenség. Én egy IBM 1620-ashoz jutottam hozzá, és el is kezdtem programokat írni, előbb statisztikai elemzésekhez, majd komponáláshoz.

Még ma is emlékszem, amikor 1968-ban bejutottam abba a hatalmas, őrzött épületbe, ahol New England akkori legnagyobb teljesítményű számítógépét, a csúcsmoddellnek számító IBM 360 Model 91-et őrizték, egymillió byte (egy megabyte) ferritgyűrűs memóriával és lenyűgöző, másodpercenként egymillió utasításos (egy MIPS) sebességgel – és mindössze óránként ezer dollár bérleti díjjal. Írtam egy programot, ami a végzős középiskolásokat párosította össze az egyetemekkel, és lenyűgözve néztem, ahogy a vezérlőpult lámpái jellegzetes mintába rendeződtek, miközben a számítógép feldolgozta az egyes diákok jelentkezési lapjait.^[4] Noha kívülről ismertem a kód minden sorát, amikor a lámpák minden egyes ciklus végén elsötétültek néhány pillanatra mégis úgy tűnt, mintha a számítógép mélyen elgondolkodott volna. A gép igazából tíz másodperc alatt végezte el azt a munkát, amit mi kézzel tíz órán át, sokkal pontatlanabban csináltunk volna meg.

Az 1970-es években rájöttem, hogy találmányaimnak megalkotása során azt is mérlegelnem kell, milyen technológia szükséges a gyártásukhoz és milyen piaci erők működnek a piacra vezetésükkor, mivel a világ valószínűleg teljesen más lesz akkor, mint amikor ötletként megszülettek. Elkezdtem modelleket kidolgozni arra, hogy az egyes technológiák – az elektronika, a kommunikáció, a számítógép-processzorok, a memóriák, a mágneses adattároló eszközök és a többi – hogyan fejlődtek, és hogyan söpörtek végig változásaik hullámai a piacokon és végül a társadalmi intézményeinken. Rájöttem, hogy a legtöbb találmány nem azért bukik meg, mert a kutatás-fejlesztés részleg nem tudja megvalósítani őket, hanem azért, mert rossz az időzítésük. A feltalálás nagyon hasonló a szörfözéshez: az embernek előre kell látnia az érkező hullámot, és a megfelelő pillanatban kell meglovagolnia azt.

A technológiai trendek és következményeik iránti érdeklődésem az 1980-as években kelt önálló életre, és elkezdtem arra használni a modelljeimet, hogy megjósoljam és előre jelezzem a 2000-ben, 2010-ben, 2020-ban és azon túl várható technológiákat és innovációkat. Ez lehetővé tette, hogy feltérképezsem a jövőben rejlő lehetőségeket olyan találmányok kigondolásával és megtervezésével, amelyek ezeket a jövőbeli képességeket hasznosítják. Az 1980-as évek második felében megírtam első könyvemet, a *The Age of Intelligent Machines*-t (*Az intelligens gépek kora*).^[4] Ebben kiterjedt (és elég pontos) előrejelzéseket tettem az 1990-es és 2000-es évekre, a végén pedig felbukkant annak a gépi értelemnek a kísértete, amely a XXI. század első felében megkülönböztethetetlené válik emberi alkotóinak intelligenciájától. Ez megdöbbentő végkövetkeztetésnek tűnt, és én személy szerint nem is voltam képes ezen a mindent megváltoztató átalakuláson túl látni.

Az elmúlt húsz évben megtanultam értékelni egy fontos metaeszmét: azt, hogy a világ megváltoztatását célzó eszmék ereje is egyre növekszik. Noha az emberek általában készségesen egyetértenek ezzel a megállapítással, amikor hallják, viszonylag kevés megfigyelő fogja fel igazán mélyre ható következményeit. A következő néhány évtizedben lehetőségünk nyílik majd eszméket alkalmazni évszázados problémák legyőzésére – és közben létrehozni néhány új problémát.

Az 1990-es években empirikus adatokat gyűjtöttem az információval kapcsolatos technológiák látszólagos gyorsulásáról, és igyekeztem finomítani a megfigyeléseim mögött rejlő matematikai

modelleket. Kidolgoztam egy elméletet, amelyet a gyorsuló megtérülések törvényének neveztem el, s amely arra ad magyarázatot, hogy a technológiai és evolúciós folyamatok miért exponenciális módon haladnak előre.⁴⁵¹ A *The Age of Spiritual Machines (ASM) (A spirituális gépek kora)* című, 1998-ban írt könyvemben megkíséreltem ábrázolni az emberi életet úgy, ahogy majd akkor létezik, amikor az emberi és gépi tudatosság egybemosódik. Ezt a korszakot valójában a biológiai örökségünk és a biológiát meghaladó jövő közötti egyre szorosabb együttműködés korának tekintetem.

Az *ASM* megjelenése óta a civilizációnk jövőjén, illetve a világegyetemben elfoglalt helyünkkel való kapcsolatán gondolkodom. Noha nehéznek tűnhet elképzelni a jövő civilizációjának képességeit, melynek intelligenciája óriási mértékben meghaladja majd a miénket, képességünk, hogy az elménkben modelleket alkossunk a valóságról, lehetővé teszi, hogy fontos megállapításokat tegyünk biológiai gondolkodásunk és az általunk jelenleg is teremtett nem biológiai gondolkodás közelgő egybeolvadásáról. Ezt a történetet szeretném elbeszélni ebben a könyvben. A történetnek az a gondolat az alapja, hogy képesek vagyunk megérteni saját intelligenciánkat – ha úgy tetszik, hozzáférünk saját forráskódunkhoz –, illetve képesek vagyunk felülvizsgálni és kibővíteni azt.

Egyesek kétségbe vonják, hogy a saját gondolkodásunkat alkalmazhatjuk a saját gondolkodásunk megértésére. Douglas Hofstadter mesterségesintelligencia-kutató szerint „lehet, hogy egyszerűen sorsszerű véletlen, hogy az agyunk túl gyenge ahhoz, hogy megértse önmagát. Gondoljunk például az egyszerű zsiráfra, amelynek az agya nyilvánvalóan sokkal alacsonyabb szintű annál, mint ami az önmegértéshez szükséges – mégis figyelemre méltó hasonlóságokat mutat a mi agyunkkal”.⁴⁶¹ Nekünk azonban már sikerült modelleznünk az agyunk egyes részeit – neuronokat és fontos neurális területeket –, és ezeknek a modelleknek az összetettsége sebesen nő. Előrehaladásunk az emberi agy visszafejtésében – kulcsfontosságú probléma, amit részletesen tárgyalni fogok a könyvben – azt bizonyítja, hogy igenis rendelkezünk azzal a képességgel, hogy megértsük, modellezzük és kiterjesszük saját intelligenciánkat. Ez fajunk egyedi mivoltának egyik aspektusa: az intelligenciánk éppen a fölött a kritikus küszöb fölött helyezkedik el, ami ahhoz szükséges, hogy a kreatív erő korlátoktól mentes magasságaiba növeljük saját képességeinket – és van szembefordítható végtagnyúlványunk (a hüvelykujjunk), ami ahhoz kell, hogy az akaratunknak megfelelően manipuláljuk a világegyetemet.

Egy szót még a varázslatos tevékenységekről: abban az időben, amikor a Tom Swift Jr. könyveket olvastam, lelkes bűvész is voltam. Élveztem közönségem örömét, ahogy a valóság látszólag lehetetlen átalakításait megélték. Kamaszéveimben szalonmágiámat technológiai projektekre cseréltem le. Felfedeztem, hogy az egyszerű trükkökkel szemben a technológia nem veszíti el transzcendens erejét, amikor felfedik titkait. Gyakran gondolkodom Arthur C. Clarke harmadik törvényére: „bármely, kellőképpen fejlett technológia megkülönböztethetetlen a mágiától”.

Gondoljunk csak J. K. Rowling Harry Potter-sorozatára ebből a szemszögből! Elképzelt történet, mégsem ésszerűtlen látomás a világunkról, ahogyan az alig néhány évtized múlva létezni fog. Lényegében a Potter-könyvek összes „varázslata” valóra fog válni azon technológiák révén, melyeket ebben a könyvben bemutatok. A tökéletes átélést kínáló virtuális valóságokban lehetséges lesz kviddicset játszani és másokat elvarázsolni – és nanoeszközök alkalmazásával lehetségessé válik mindez a valódi valóságban is. Az időnyerő (a *Harry Potter és az azkabani fogoly*ből) már nehezebb ügy, bár komoly elméletek láttak napvilágot ezen a téren is (megkerülve az időparadoxont), legalábbis az információbitek szintjén, és lényegében mi is azokból állunk. (Lásd a 3. fejezetet a számítási képesség végső korlátairól.)

Gondoljunk arra, ahogy Harry a megfelelő varázsigét kimondva beveti a mágiáját! Ezeknek a

varázsigéknek a felfedezése és alkalmazása természetesen nem egyszerű. Harrynek és társainak pontos sorrendben, pontosan hangsúlyozva, a megfelelő mozdulatok kíséretében kell elmondaniuk a bűbájaikat. Ez a folyamat pontosan megfelel a technológiával kapcsolatos tapasztalatainknak. A mi varázsigéink a modern világ mágiája mögött rejlő képletek és algoritmusok. A megfelelő sorrend alkalmazásával rá tudjuk venni a számítógépet, hogy hangosan felolvasson egy könyvet, megértse az emberi beszédet, előre jelezzon (és megakadályozzon) egy szívrohamot, vagy megjósolja a tőzsdei árfolyammozgásokat. Ha a varázsige csak egy kicsit is pontatlan, a varázslat meggyengül vagy egyáltalán nem működik.

Ezzel a metaforával szemben felmerülhet az az ellenvetés, hogy a roxfordi varázsigék rövidek, tehát nem tartalmazznak túl sok információt, például egy modern szoftverhez képest. Ám a modern technológia lényegi eljárásai alapján véve ugyanilyen tömörek. A szoftverműködés alapelvei úgy fejlődnek, hogy egy beszédfelismerő programot néhány oldalnyi formulával meg lehet írni. Egy-egy kulcsfontosságú technológiai előrelépés gyakran nem más, mint egy meglévő formula apró megváltoztatása.

Ugyanezek a megállapítások érvényesek a biológiai evolúció „találmányaira”: gondoljunk például arra, hogy a csimpánz és az ember közötti genetikai eltérés mindössze néhány százezer byte-nyi információ! Noha a csimpánzok is képesek bizonyos mértékű szellemi teljesítményre, azok a parányi eltérések a génjeinkben elegendőek voltak ahhoz, hogy a mi fajunk megteremtse a technológia mágiáját.

Muriel Rukeyser szerint „a világegyetemet történetek alkotják, nem atomok”. A 7. fejezetben „mintakeresőnek” nevezem magam, olyasvalakinek, aki az információmintázatokat tekinti az alapvető valóságnak. Például az agyamat és a testemet alkotó részecskék hetente változnak, ám az általuk alkotott mintázatokban folytonosság figyelhető meg. A történeteket jelentéssel bíró információmintázatoknak lehet tekinteni, tehát ebből a perspektívából is értelmezhetjük Muriel Rukeyser aforizmáját. Ez a könyv ily módon az emberi–gépi civilizáció sorsának a története; annak a sorsnak, amit szingularitásnak fogunk nevezni.

Első fejezet

A hat korszak

„Mindenki a saját látásának a korlátait véli a világ korlátainak.”

(Arthur Schopenhauer)

Nem tudom, mikor eszméltem rá a szingularitásra. Úgy vélem, fokozatos ráébredés volt. Az alatt a közel fél évszázad alatt, melynek során elmélyedtem a számítástechnikában és a hozzá kapcsolódó technológiákban, mindvégig próbáltam megérteni annak a folyamatos felfordulásnak az értelmét és célját, amelynek oly sok szinten szemtanúja voltam. Fokozatosan körvonalazódott előttem egy átalakító esemény, amely a XXI. század első felében fog bekövetkezni. Ahogyan az űrben egy fekete lyuk drámaian megváltoztatja az eseményhorizontja felé gyorsuló anyag és energia mintázatát, a jövőnkben közelgő szingularitás is egyre jobban átalakítja az emberi élet minden intézményét és aspektusát, a szexualitástól kezdve a spiritualitásig.

Tehát mi is a szingularitás? Egy jövőbeli korszak, melyben a technológiai változás üteme olyan gyors lesz, a hatása pedig olyan mély, hogy az emberi élet visszafordíthatatlanul átalakul. Noha ez a korszak se nem utópisztikus, se nem disztópikus, át fogja alakítani azokat a fogalmakat, amelyekre támaszkodva értelmet adunk az életünknek, az üzleti modellektől kezdve az emberi élet hosszáig, beleértve magát a halált is. A szingularitás megértése meg fogja változtatni a múlt jelentőségéről és a jövőnk lehetséges elágazásairól alkotott elképzeléseinket. Teljes megértése szükségképpen megváltoztatja az ember felfogását általában az életről, de a saját életéről is. Azokat, akik megértik a szingularitást és reflektálnak a saját életükre gyakorolt hatásaira, „szingularitáriánusoknak” fogom nevezni.⁴⁷¹

Megértem, sokan miért nem fogadják el annak a nyilvánvaló következményeit, amit én a gyorsuló megtérülések törvényének neveztem el (az evolúció inherens gyorsulását, és a technológiai evolúciót mint a biológiai evolúció folytatását). Nekem is negyven év kellett, hogy meglássam, ami végig itt volt az orrom előtt, és még ma sem mondhatom, hogy teljes megnyugvással töltenek el lehetséges következményei.

A közelgő szingularitás mögött rejlő kulcsgondolat az, hogy az ember alkotta technológia változásainak üteme gyorsul, a képességei pedig exponenciálisan nőnek. Az exponenciális növekedés csalóka dolog. Szinte észrevétlenül kezdődik, majd váratlan dühvel kirobban – mármint akkor váratlan, ha az ember nem figyel a pontos pályájára (lásd: *A lineáris és az exponenciális növekedés* ábrát később).

Gondoljuk végig a következő példát: egy tó gazdája otthon akar maradni, hogy gondozza a tóban élő halakat, és gondoskodjon róla, hogy a víz felszínét ne borítsák be a tavirózsák levelei, melyekről azt mondják, néhány naponként megduplázódik a számuk. Hónapokon át türelmesen várakozik, ám mindig csak kis liliomfoltokat lát, amelyek látszólag nem terjednek észrevehetően. Mivel a tavirózsa csak a tó felszínének egy százalékát borítja be, a tulajdonos úgy gondolja, nyugodtan elmehet nyaralni a családjával. Ám amikor néhány hét múlva hazatér, megdöbbenve látja, hogy a vízililomok levelei az egész tavat befedték, és az összes hala elpusztult. Mivel a növény néhány naponként megduplázta levelei számát, az utolsó egy hét terjeszkedése elég volt ahhoz, hogy az egész tavat befedje. (Hét duplázással 128-szorosára nőtt a kiterjedése.) Ilyen az exponenciális növekedés.

Vagy gondoljunk Garri Kaszparovra, aki 1992-ben még lenézően nyilatkozott a számítógépes sakk

számalmas állapotáról, ám az évenként megduplázódó számítási kapacitás lehetővé tette, hogy mindössze öt évvel később legyőzze egy számítógép.¹⁸¹ Egyre gyorsabban nő azoknak a területeknek a listája, ahol a számítógépek képességei meghaladják az emberét. Emellett a számítógépes intelligencia egykor szűk alkalmazási területei is fokozatosan bővülnek, egyre több tevékenységet ölelve fel. Például ma már a számítógépek elektrokardiogramokat és orvosi képeket diagnosztizálnak, repülőgépeket vezetnek, automatizált fegyverek taktikai döntéseit vezérlik, pénzügyi döntéseket hoznak és hiteleket bírálják el, és sok egyéb feladatot is átvettek, amik egykor az emberi intelligencia közreműködését igényelték. Ezeknek a rendszereknek a teljesítménye egyre inkább többféle mesterséges intelligencia (MI) integrálásán alapul. Ám amíg egyetlen MI is hibázik bármelyik ilyen területen, a szkeptikusok mindig úgy fognak mutogatni arra a területre, mint a saját teremtményeink képességei fölötti emberi felsőbbrendűség inherens bástyájára.

Ez a könyv viszont amellet fog érvelni, hogy az információalapú technológiák néhány évtizeden belül fel fogják ölelni az összes emberi ismeretet és jártasságot, és végső soron elsajátítják az emberi agy mintafelismerő képességeit, problémamegoldó eszköztárát, illetve érzelmi és erkölcsi intelligenciáját is.

Noha az agy sok szempontból lenyűgöző, komoly korlátai is vannak. Masszív párhuzamosságát (százbillió idegsejtek közötti kapcsolat működik benne egyidejűleg) kihasználva gyorsan felismerjük a finom mintázatokat, ám a gondolkodásunk rendkívül lassú: az alapvető idegsejt-tranzakciók több milliószor lassabbak, mint a jelenlegi elektronikus áramkörök, és ettől az új információ feldolgozására rendelkezésre álló fiziológiai sáv szélességünk rendkívül korlátozott a teljes emberi tudásbázis exponenciális növekedéséhez képest.

A mi 1.0-s verziójú biológiai testünk hasonlóképpen törekeny és miriádnyi hibalehetőségnek van kitéve, nem is beszélve a nehézkes karbantartási rituálékról. Míg az emberi intelligencia néha képes kreativitásában és kifejezőerejében szárnyalni, az emberi gondolatok nagy része nem eredeti, hanem kicsinyes és behatárolt.

A szingularitás lehetővé fogja tenni, hogy meghaladjuk biológiai testünk és agyunk korlátait. Uralkodni fogunk a sorsunk fölött. A kezünkbe kerül a halandóságunk. Olyan sokáig élhetünk majd, amilyen sokáig csak akarunk (ami nem ugyanaz, mintha azt mondanánk, hogy örökké fogunk élni). Teljesen érteni fogjuk az emberi gondolkodást, és hatalmas mértékben ki fogjuk terjeszteni és tágítani a hatókörét. Ennek a századnak a végére intelligenciánk nem biológiai része billiószor billiószor erősebb lesz, mint a támogatása nélküli emberi intelligencia.

Jelenleg ennek az átmenetnek a kezdeti szakaszaiban vagyunk. A paradigmaváltás gyorsulása (az a sebesség, amivel megváltoztatjuk az alapvető technológiai megközelítéseket), illetve az információtechnológia kapacitásának exponenciális növekedése kezdi elérni a „görbe térdét”, azt a pontot, ahol az exponenciális trend észrevehetővé válik. Nem sokkal ezután a pont után a trend gyors ütemben kirobbanóvá válik. A technológiánk fejlődésének sebessége – és ez a technológia megkülönböztethetetlen lesz önmagunktól – ennek a századnak a közepe előtt olyan meredek lesz, hogy gyakorlatilag függőlegesnek fog tűnni. Szigorúan matematikai szempontból a növekedés üteme még mindig véges lesz, de olyan szélsőséges, hogy az okozott változások szinte szét fogják szakítani az emberi történelem szövetét – legalábbis így fogja látni a régimódi biológiai emberiség.

A szingularitás lesz a biológiai gondolkodásunk és létezésünk technológiával való egybeolvadásának a csúcspontja, aminek eredményeképpen olyan világ születik, amely megmarad emberinek, ám meghaladja biológiai gyökereinket. A szingularitás után nem lesz különbség ember és gép, a fizikai és a virtuális valóság között. Ha valakiben felmerül a kérdés, hogy mi marad

egyértelműen emberi ebben a világban, akkor a válasz ennyi: az, hogy a mi fajunk az, amelyik inherensen fizikai és szellemi hatóköre aktuális határainak a kitágítására törekszik.

Ezeknek a változásoknak a kapcsán sok elemző arra koncentrál, hogy az átalakulás eredményeképpen szerintük elveszítjük emberi mivoltunk valamilyen létfontosságú aspektusát. Ez a nézőpont azonban annak a félreértéséből fakad, hogy milyenné válik a technológiánk. Minden gépből, amivel mindmáig találkozunk, hiányzik az emberi biológiai jellemzők finomsága. Noha a szingularitásnak sok arca van, a legfontosabb következménye az, hogy a technológiánk előbb utoléri, majd nagymértékben meghaladja mindannak a kifinomultságát és rugalmasságát, amit a legjobb emberi jellemzőknek tartunk.

Az intuitív lineáris nézet, szemben a történelmi exponenciális nézettel

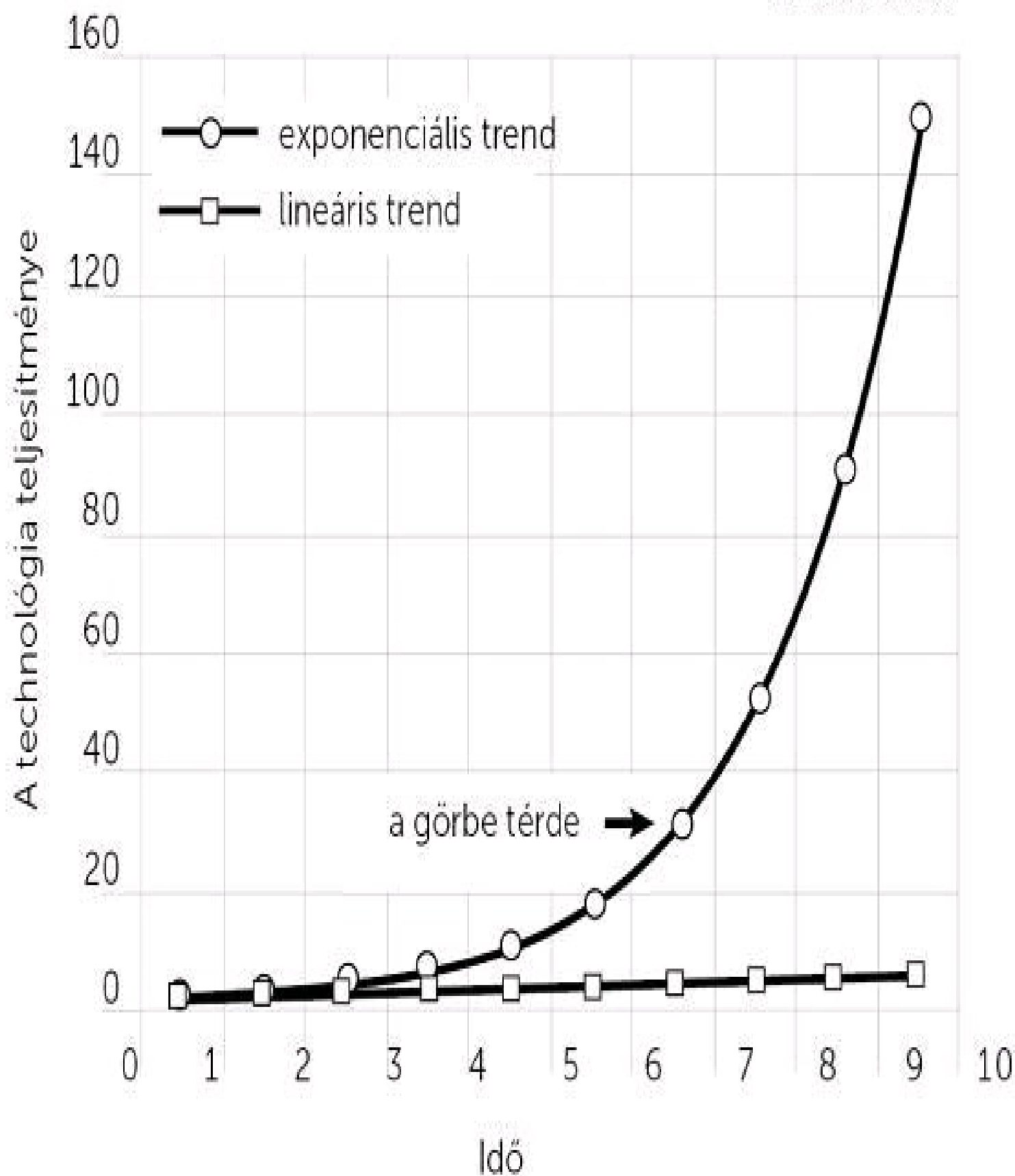
„Amikor létrejön az első transzhumán intelligencia, és belekezd rekurzív önfejlesztésébe, valószínűleg alapvető diszkontinuitás következik be, aminek a jellegét még csak el sem tudom kezdeni megjósolni.”

(Michael Anissimov)

Az 1950-es években Neumann János, a legendás információteoretikus azt mondta: „a technológia egyre gyorsuló fejlődése... azt a látszatot kelti, mintha fajunk történetének valamiféle lényegi szingularitásához közelednénk, amelyet elérve nem folytatódhat az emberi élet az általunk ismert formájában.”^[9] Neumann két fontos megállapítást tett itt: *gyorsulás* és *szingularitás*. Az első szerint az emberi fejlődés exponenciális (azaz egy állandóval újra és újra *megszorozva* növekszik), nem pedig lineáris (azaz egy állandót újra és újra *hozzáadva* növekszik).

A lineáris és az exponenciális növekedés

Lineáris skála



Lineáris és exponenciális: a lineáris növekedés egyenletes, az exponenciális növekedés robbanásszerű

A második az, hogy az exponenciális növekedés csalóka: lassan, gyakorlatilag észrevétlenül kezdődik, de a görbe térdén túl robbanásszerűvé és mélyen átalakítónak válik. A jövőt széles körben félreértik. Elődeink arra számítottak, hogy nagyjából ugyanolyan lesz, mint a jelen, ami pedig nagyjából olyan, mint a múlt volt. Exponenciális trendek ezer évvel ezelőtt is léteztek, de még a nagyon korai szakaszukban, olyan laposan és lassan, hogy nem is tűntek trendeknek. Ennek eredményeképpen teljesült a megfigyelők várakozása, hogy a jövő nem fog változni a múlthoz képest. Ma már folyamatos technológiai haladásra és az abból következő társadalmi visszhangokra számítunk, ám a jövőnk így is sokkal meglepőbb lesz, mint a legtöbben hiszik, mivel kevés megfigyelő tette igazán magáévá annak a ténynek a következményeit, hogy maga a változás sebessége is nő.

Sok hosszú távú előrejelzés arról, hogy mi lesz technikailag kivitelezhető a jövőben, drámaian alábecsüli a jövőbeli fejlődés erejét, mert a történelem általam „intuitív lineárisnak” nevezett felfogásán alapul, nem pedig a „történelmi exponenciális” felfogáson. A modelljeim azt mutatják, hogy minden évtizedben megkétszerezzük a paradigmaváltás sebességét, ahogyan arra a következő fejezetben részletesen is kitérek. Így gyorsult fel a XX. század a mai fejlődési sebességre. A 2000. évi sebességgel számolva – állandó ütemben – a múlt század egésze alatt tapasztalt fejlődéshez csupán húsz évre lett volna szükség. Ezt a húszévnnyi fejlődést aztán tizennégy év alatt, 2014-re ismételjük meg, majd mindössze hét év alatt ismét. Másképp kifejezve, nem százévnnyi technológiai fejlődést fogunk tapasztalni a XXI. században, hanem húszezer évnnyi (ismét csak a *mai* fejlődési sebességgel mérve), azaz ezerszer nagyobb, mint amekkora a teljes XX. századé volt.^[10]

A jövő milyenségével kapcsolatos tévedések gyakran, sokféle kontextusban bukkannak fel. Például nemrég részt vettem egy a molekuláris gyártás kivitelezhetőségéről tartott vitában, és egy Nobel-díjas résztvevő azzal hárította el a nanotechnológiával kapcsolatos biztonsági aggodalmakat, hogy „még száz évig nem fogunk önreplikáns, nanorészecskékből felépülő entitásokat (molekuláris darabokról darabra létrehozott eszközöket) látni.” Rámutattam, hogy a száz év megalapozott becslés, sőt egybeesik az én becslésemmel arról, hogy mekkora technológiai fejlődés kell ennek a bizonyos mérföldkönek az eléréséhez *a mai fejlődési sebességgel* (ami ötször nagyobb, mint a XX. század átlagos fejlődési sebessége). Ám mivel minden évtizedben megduplázzuk a fejlődési sebességünket, a *mai fejlődési sebességgel* számított egy évszázadnyi fejlődés mindössze huszonöt naptári év alatt fog bekövetkezni.

Hasonlóképpen, a *Time* magazin „Future of Life” (Az élet jövője) konferenciáján, amelyet 2003-ban rendeztek a DNS szerkezete felfedezésének ötvenedik évfordulója alkalmából, az összes meghívott előadót megkérdezték, szerintük milyen lesz a következő ötven év.^[11] Gyakorlatilag mindenki visszanézett az elmúlt ötven év fejlődésére, és azt használta modellként a következő ötven vonatkozásában. Például James Watson, a DNS egyik felfedezője azt mondta, hogy ötven év múlva lesznek olyan gyógyszereink, amiket szedve annyit ehetünk, amennyit akarunk, mégsem fogunk elhízni.

„Ötven év múlva?” – kérdeztem. Egereknél már meg is valósítottuk, blokkolva a zsír inzulinreceptor génjét, amely a zsír zsírsejtekben való tárolását szabályozza. Már elkezdtek az embereknek szánt gyógyszer kifejlesztését (az RNS-beavatkozásról és a többi technikáról az 5. fejezetben lesz szó), és néhány év múlva sor kerülhet az FDA^[12] tesztjeire is. Ezek a gyógyszerek már öt-tíz éven belül elérhetőek lesznek, nem ötven év múlva. Voltak még más rövidlátó előrejelzések is, amelyek inkább a jelenlegi kutatási prioritásokat tükrözték, nem pedig a következő fél évszázadban várható mélyreható változásokat. A konferencián részt vevő gondolkodók közül elsősorban Bill Joy

és én vettük figyelembe a jövő exponenciális jellegét, bár a változások fontosságában nem értünk egyet, ahogyan arra a 8. fejezetben kitérek.

Az emberek ösztönösen azt feltételezik, hogy a jelenlegi fejlődési sebesség fog fennmaradni a jövőben is. A feltételek nélkül elfogadott intuíció még azokban is azt a benyomást kelti, hogy a változások ugyanolyan sebességgel történnek, mint ahogy a közelmúltban tapasztalták, akik elég régóta itt vannak ahhoz, hogy tapasztalják, a változások sebessége egyre nő az idő múlásával. Matematikai szemszögből ennek az az oka, hogy az exponenciális görbe egyenes vonalnak tűnik, ha csak rövid időn át vizsgálják. Ennek eredményeképpen a jövőt szemlélve még a tájékozott kommentátorok is általában a jelenlegi fejlődési sebességet extrapolálják a következő tíz vagy száz évre, miközben meghatározzák elvárásaikat. Ezért nevezem „intuitív lineáris” nézetnek azt, amikor valaki így tekint a jövőre.

A technológia történetének komoly tanulmányozása azonban rávilágít, hogy a technológiai változás exponenciális. Az exponenciális növekedés minden evolúciós folyamatra jellemző – ha más-más időskálán is –, ahogyan nagyon sokféle technológiára is, az elektronikustól a biológiaiig, illetve a következményeikre, az emberi tudás mennyiségétől a gazdaság méretéig. A fejlődés és növekedés gyorsulása mindegyikre vonatkozik. Sőt, gyakran nem pusztán exponenciális növekedést tapasztalhatunk, hanem hatványozottan exponenciálisat, ami azt jelenti, hogy maga az exponenciális növekedés sebessége (azaz az exponens) is exponenciálisan növekszik (lásd például a számítás ár–teljesítmény-arányának tárgyalását a következő fejezetben.)

Sok tudósra és mérnökre jellemző az, amit én „a tudósok pesszimizmusának” nevezek. Gyakran annyira elmerülnek egy jelenbeli kihívás nehézségeiben és apró részleteiben, hogy nem ismerik fel saját munkájuk és a tágabb értelemben vett tudományterületük hosszú távú hatásait, mint ahogy azokat a sokkal erősebb eszközöket sem veszik számításba, amelyek a technológia minden egyes új nemzedékével hozzáférhetővé válnak.

A tudósokat úgy képezik, hogy szkeptikusak legyenek, hogy óvatosan beszéljenek az aktuális kutatási célokról, és hogy ritkán spekuláljanak a tudományos tevékenység aktuális nemzedékén túl. Ez kielégítő hozzáállás lehet, amikor egy tudományos-technológiai nemzedék tovább él, mint az emberi nemzedék, ám nem szolgálja a társadalom érdekeit most, amikor a tudományos-technológiai fejlődés egy-egy nemzedéke mindössze néhány évig tart.

Gondoljunk a biokémikusokra, akik 1990-ben szkeptikusak voltak azzal a célkitűzéssel kapcsolatban, hogy tizenöt éven belül meg lehet fejteni az egész emberi genomot! Ezek a tudósok egy teljes évet töltöttek a genom mindössze egy tízezredének a meghatározásával. Így még a joggal elvárható fejlődést figyelembe véve is természetesnek tűnt számukra, hogy legalább egy évszázad, ha nem több kell még a teljes genom leírásához.

Vagy gondoljunk az 1980-as évek közepének a szkepticizmusára annak kapcsán, hogy az internet valaha is fontos jelenség lesz, hiszen akkor még mindössze néhány tízezer csomópontból (más néven szerverből) állt! A csomópontok száma aztán minden évben megkétszereződött, így tíz évvel később több tízmillió csomópontra lehetett számítani. Azonban ezt a trendet nem ismerték fel azok, akik 1985-ben nehezen boldogultak a csúcstechnikával, ami akkor mindössze néhány ezer új csomópont létrehozását tette lehetővé világszerte egy év alatt.^[12]

Ezzel ellentétes konceptuális tévedés történik akkor, amikor felismernek, majd agresszívan, a növekedés sebességének megfelelő modellezése nélkül alkalmaznak valamilyen exponenciális jelenséget. Az exponenciális növekedés idővel felgyorsul, ám ez nem egyik pillanatról a másikra következik be. A tőkeértékek felfutása (azaz a tőzsdei árak) az „internetbuborék” vagy „dotcom lufi”

és a hozzá kapcsolódó telekommunikációs buborék (1997–2000) idején nagyrészt amiatt következett be, hogy eltúlozták az egyenletes exponenciális növekedéssel kapcsolatos várakozásokat. Ahogyan azt a következő fejezetben be fogom mutatni, az internet és az e-kereskedelem valódi alkalmazása fellendülésen és visszaesésen, konjunktúrán és dekonjunktúrán keresztül mutatott egyenletes exponenciális növekedést; az eltúlzott növekedési várakozások csak a tőke (részvények) árazására voltak hatással. Hasonló tévedéseket láttunk már korábbi paradigmaváltások idején is – például a vasútépítés korszakának elején, az 1830-as években, mikor egy az internet fellendüléséhez és visszaeséséhez igen hasonlatos folyamat vezetett el a lázas vasútépítéshez.

A prognóziskészítők másik hibája az, amikor egy jelenbeli trend okozta változásokat úgy vizsgálnak, mintha semmi más nem változna a világban. Jó példa erre az az aggodalom, hogy az élet radikális meghosszabbítása túlnépesedéshez és az emberi élet fenntartásához szükséges véges anyagi források kimerüléséhez fog vezetni. Ez az aggodalom nem vesz tudomást a nanotechnológia és az erős MI által teremtett, hasonlóképpen radikális bőségről. Például a 2020-as években a nanotechnológián alapuló gépek képesek lesznek bármilyen terméket előállítani olcsó nyersanyagokból és információból.

Azért hangsúlyozom az exponenciális és lineáris nézőpontok ellentétét, mert ez a legfontosabb tévedés, amit a prognóziskészítők elkövetnek, miközben a jövőbeli trendeket vizsgálják. A legtöbb technológiai előrejelző és előrejelzés nem vesz tudomást a technológiai fejlődés történelmi exponenciális jellegéről. Ezért hajlamosak az emberek túlbecsülni, mi valósítható meg rövid távon (mivel hajlamosak vagyunk kihagyni elengedhetetlen részleteket), és alábecsülni, mi valósítható meg hosszú távon (mert nem vesznek tudomást az exponenciális növekedésről).

A hat korszak

„Előbb megépítjük a szerszámokat, aztán azok építenek meg minket.”

(Marshall McLuhan)

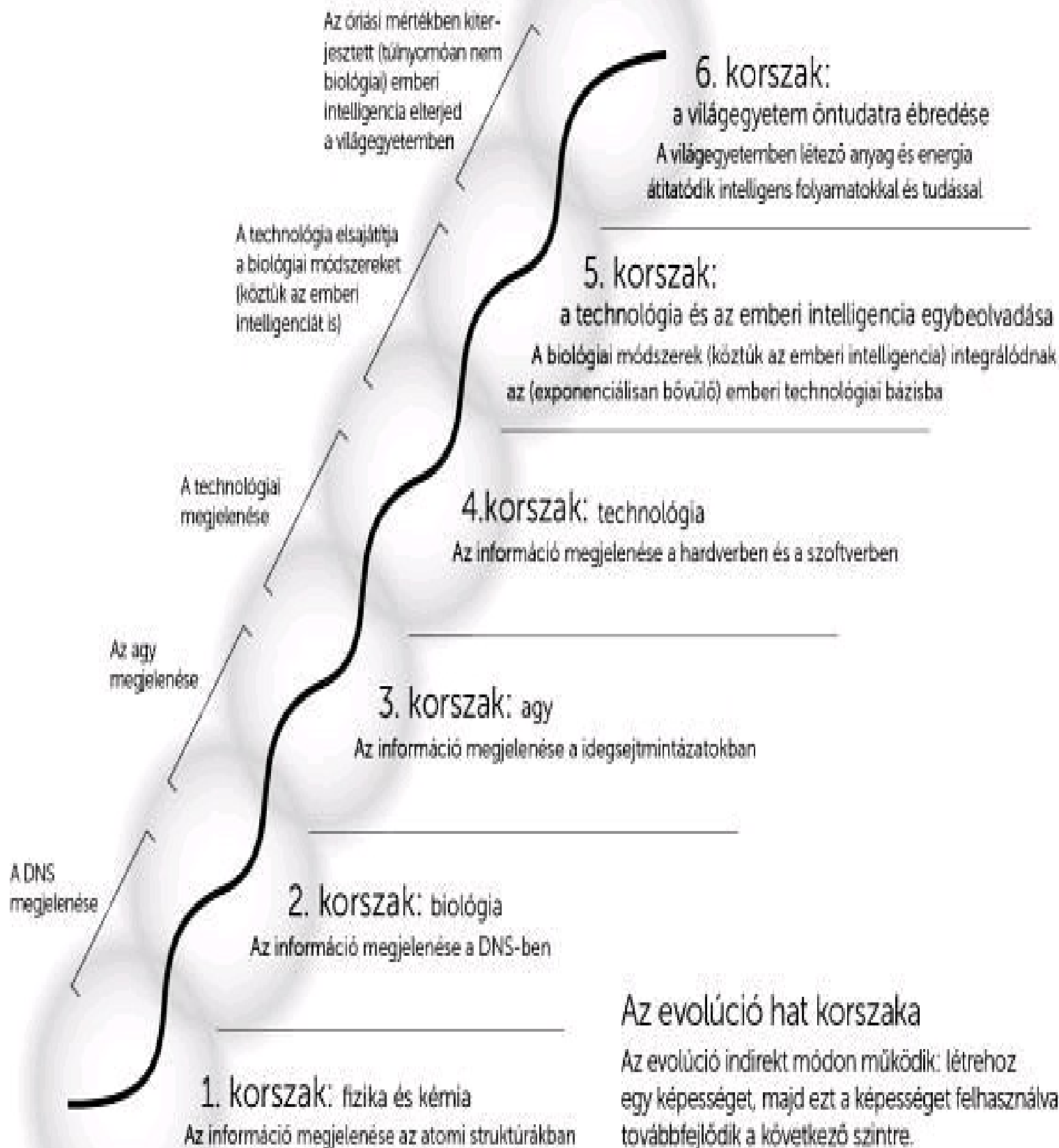
„Már a jövő sem a régi.”

(Yogi Berra)

Az evolúció az egyre rendezettebb mintázatok létrehozásának folyamata. A rendezettség fogalmát a következő fejezetben tárgyalom; ebben a részben a mintázatok fogalmán van a hangsúly. Meggyőződésem, hogy a mintázatok evolúciója alkotja világunk végső történetét. Az evolúció indirekt módon működik: minden fázis vagy korszak az előző korszak információfeldolgozó módszereit felhasználva hozza létre a következőt. Az én felfogásomban az evolúció – a biológiai és a technológiai egyaránt – története hat korszakban zajlik le. Amint arra még kitérünk, a szingularitás az ötödik korszakkal fog elkezdődni, és a hatodik korszakban fog elterjedni a Földről a világegyetem többi részébe.

Első korszak: fizika és kémia. Eredetünket egy olyan állapotig vezethetjük vissza, ami alapvető struktúráiban jeleníti meg az információt: anyag- és energiamintákban. A kvantumgravitáció legújabb elméletei szerint a tér és az idő diszkrét kvantumokra, lényegében információtöredékekre bontható le. Arról még vita folyik, hogy az anyag és az energia végső soron analóg vagy digitális-e, de a probléma megoldásától függetlenül tudjuk, hogy az atomi struktúrák diszkrét információt tárolnak és jelenítenek meg.

Néhány százezer évvel a Nagy Bumm után elkezdtek kialakulni az atomok, ahogy az elektronok csapdába estek a protonokból és neutronokból álló atommagok körüli pályákon. Az atomokat „ragadóssá” tette elektromos szerkezetük. A kémia néhány millió évvel később született meg, amikor az atomok összekapcsolódtak és viszonylag stabil struktúrákat, molekulákat hoztak létre. Az összes elem közül a szén bizonyult a legsokoldalúbbnak, mivel négy irányban képes kötést létrehozni (szemben a legtöbb elem egy-három irányával), és így bonyolult, információban gazdag, háromdimenziós struktúrák jöhettek létre.



Az evolúció hat korszaka

Az evolúció indirekt módon működik: létrehoz egy képességet, majd ezt a képességet felhasználva továbbfejlődik a következő szintre.

Az univerzum törvényei éppen olyanok, és az alapvető erők kölcsönhatását irányító fizikai állandók értéke éppen akkora – még hozzá megdöbbentő, végtelig menő pontossággal –, hogy az lehetővé teszi világunkban az információ rendszerezését és evolúcióját (aminek eredményeképpen egyre nő az összetettség). Az emberben önkéntelenül is felmerül a kérdés, hogyan jöhetett létre egy ilyen rendkívül valószínűtlen helyzet. Ahol egyesek az isteni kezet látják, ott mások a saját kezünket – nevezetesen az antropikus elvet, mely szerint csak abban a világegyetemben létezhetünk és tehetünk fel ilyen kérdéseket, amely lehetővé tette a kifejlődésünket.^[13] A párhuzamos univerzumokkal foglalkozó legújabb fizikai elméletek szerint sorra keletkeznek az új világegyetemek, mindegyik a saját egyedi törvényeivel, de a többségük gyorsan elpusztul vagy érdekes mintázatok (amilyen például a földi biológia hozott létre) kialakulása nélkül létezik tovább, mert a törvényeik nem támogatják az egyre összetettebb formák kialakulását.^[14] Nehéz elképzelni, hogyan tehetnénk próbára ezeket az evolúciós elméleteket a korai kozmológiára alkalmazva, de nyilvánvaló, hogy a világegyetemünk fizikai törvényei pontosan olyanok, amilyenekre szükség van ahhoz, hogy lehetővé tegyék az egyre nagyobb rendezettség és összetettség evolúcióját.^[15]

Második korszak: biológia és DNS. A több milliárd évvel ezelőtt elkezdődött második korszakban a szénalapú vegyületek egyre összetettebbek lettek, míg végül az összetett molekulacsoportok önmagukat replikáló mechanizmusokat hoztak létre, és megjelent az élet. A biológiai rendszerek végül kifejlesztettek egy pontos digitális mechanizmust (a DNS-t) a nagyobb molekulatársulás leírására szolgáló információ tárolásához. Ez a molekula kodonokból és riboszómákból álló támogató rendszerével lehetővé tette, hogy megörökítésre kerüljenek a második korszak evolúciós kísérletei.

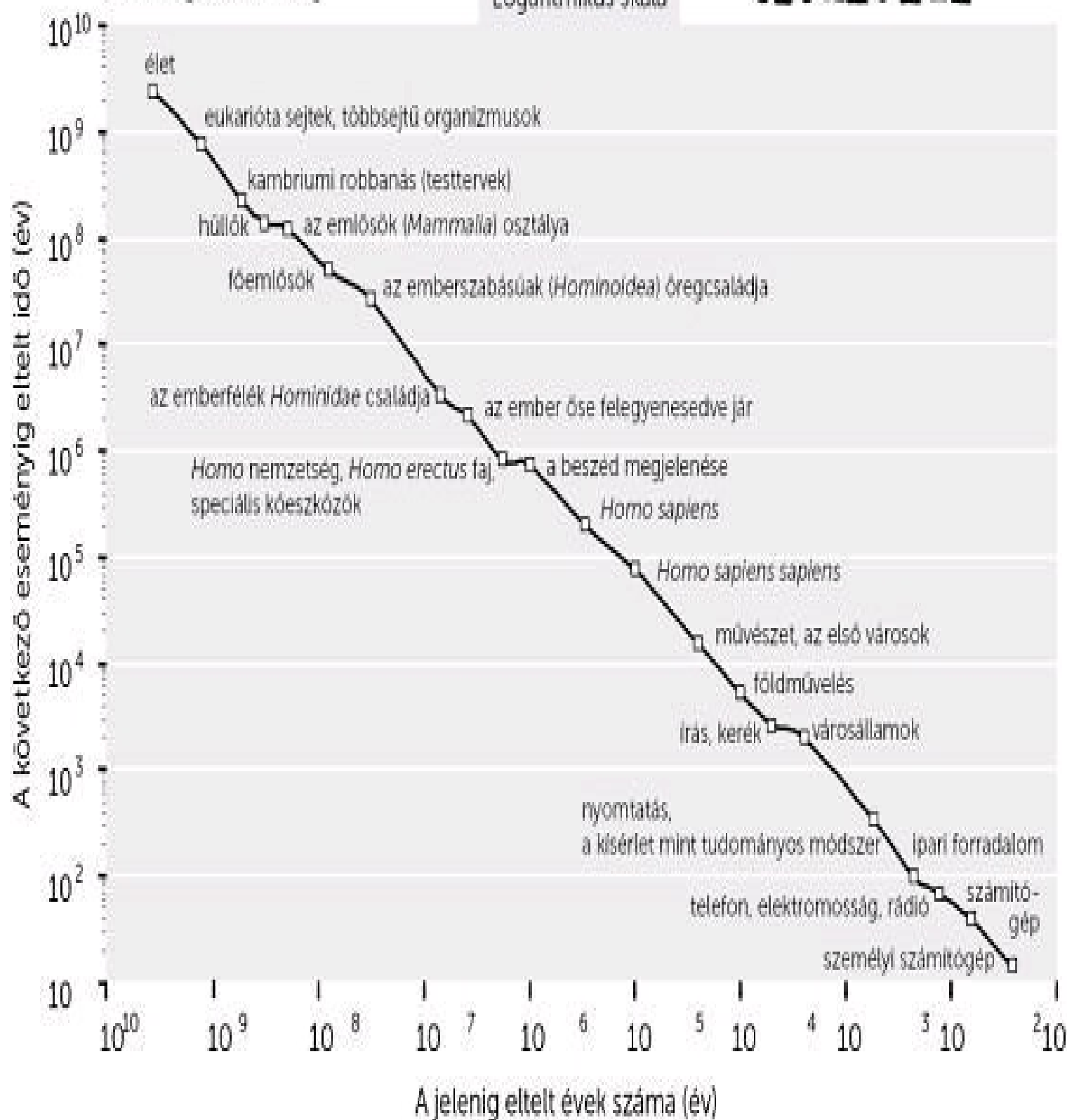
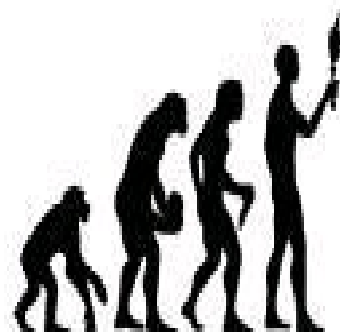
Harmadik korszak: agy. Mindegyik korszak egy-egy, a „közvetettség” következő szintjére való paradigmaváltással folytatja az információ evolúcióját. (Azaz, az evolúció az egyik korszak eredményét felhasználva teremti meg a következő korszakot.) Például a harmadik korszakban a DNS-vezérelt evolúció olyan organizmusokat hozott létre, amelyek képesek voltak érzékszerveikkel érzékelni az információt, és fel tudták dolgozni, illetve el tudták tárolni ezt az agyukban és az idegrendszerükben. Ez a második korszakbeli mechanizmusoknak (a DNS-nek és a génkifejezést vezérlő fehérjék, valamint RNS-töredékek epigenetikus információinak) köszönhetően vált lehetségessé, amelyek (közvetett módon) lehetővé tették és meghatározták a harmadik korszakbeli információfeldolgozó mechanizmusokat (az organizmusok agyát és idegrendszerét). A harmadik korszak a legelső állatok azon képességével kezdődött, hogy felismerjék a mintázatokat, ami mindmáig az agyunk egyik legfőbb tevékenysége.^[16] Végül a fajunk kifejlesztette a képességet arra, hogy absztrakt mentális modelleket készítsen a megtapasztalt világról, és elgondolkozzon ezeknek a modelleknek a racionális folyamányairól. Rendelkezünk a képességgel, hogy áttervezzük a világot az elménkkel, majd tetteink révén valóra váltsuk elképzeléseinket.

Negyedik korszak: technológia. A racionális és absztrakt gondolkodás adományát, valamint a többivel szembefordítható ujját, a hüvelykujjat kombinálva fajunk átlépett a negyedik korszakba és a közvetettség következő szintjére: az ember által teremtett technológia evolúciójába. Ez egyszerű mechanizmusokkal kezdődött, és a bonyolult automatákig (önállóan működő mechanikus gépekig) fejlődött. Végül a fejlett számító- és kommunikációs eszközök révén maga a technológia is képessé

vált bonyolult információmintázatok érzékelésére, tárolására és értékelésére. Az intelligenciának a biológiai és a technológiai evolúció során tapasztalt eltérő fejlődési sebessége a következőkkel szemléltethető: míg a legfejlettebb emlősök körülbelül tizenöt köbcentiméterrel növelték az agytérfogatukat minden százezer évben, addig a számítógépek számítási kapacitása évente nagyjából megduplázódik (lásd a következő fejezetet). Természetesen sem az agytérfogat, sem a számítási kapacitás nem határozza meg önmagában az intelligenciát, de fontos tényezői annak.

Visszaszámlálás a szingularitásig

Logaritmikus skála

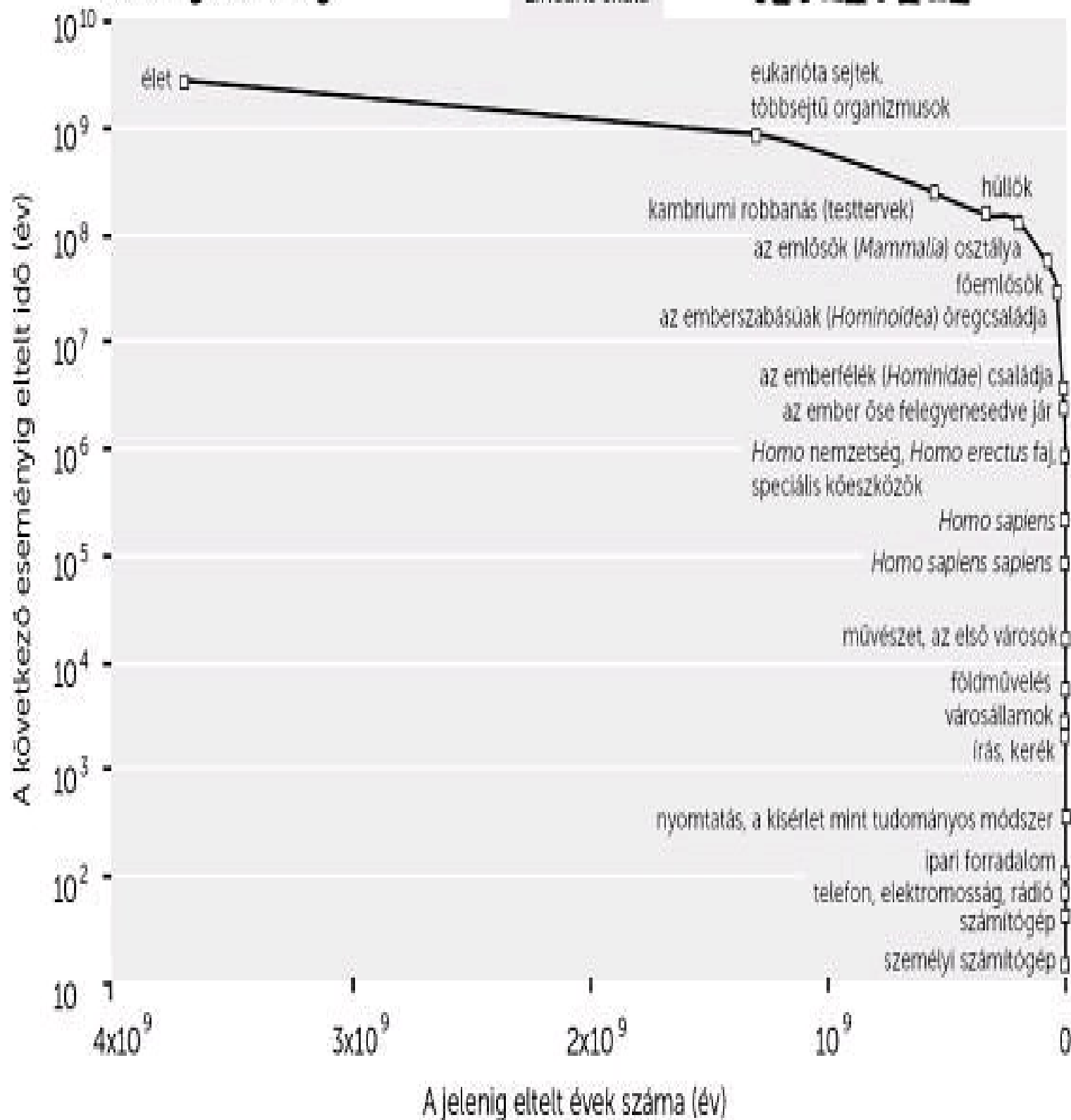
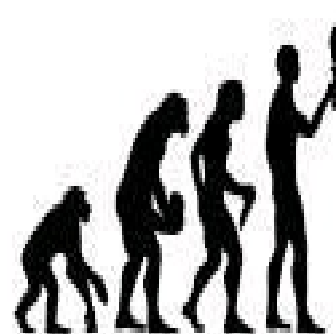


Az evolúció logaritmikus ábrázolása: ha elhelyezzük egy grafikonon a biológiai evolúció és az emberi technológia fejlődésének legfontosabb mérföldköveit, logaritmikus skálán felvéve a x tengelyt (az eltelt évek száma) és a y tengelyt (a paradigmaváltáshoz szükséges idő), akkor nagyjából egyenes (folytonosan csökkenő) vonalat kapunk, ami azt mutatja, hogy a biológiai evolúció egyenesen vezet el az ember által irányított fejlődéshez. [\[17\]](#)

Az evolúció lineáris ábrázolása: az előző ábrának a következő oldalon lévő változata ugyanazokat az adatokat ábrázolja, ám a jelenig eltelt éveket nem logaritmikus, hanem lineáris skálán. Ez drámaiabban mutatja a gyorsulást, de nem láthatók a részletek. Lineáris szemszögből nézve a legtöbb kulcsesemény „nemrég” következett be.

Visszaszámlálás a szingularitásig

Lineáris skála

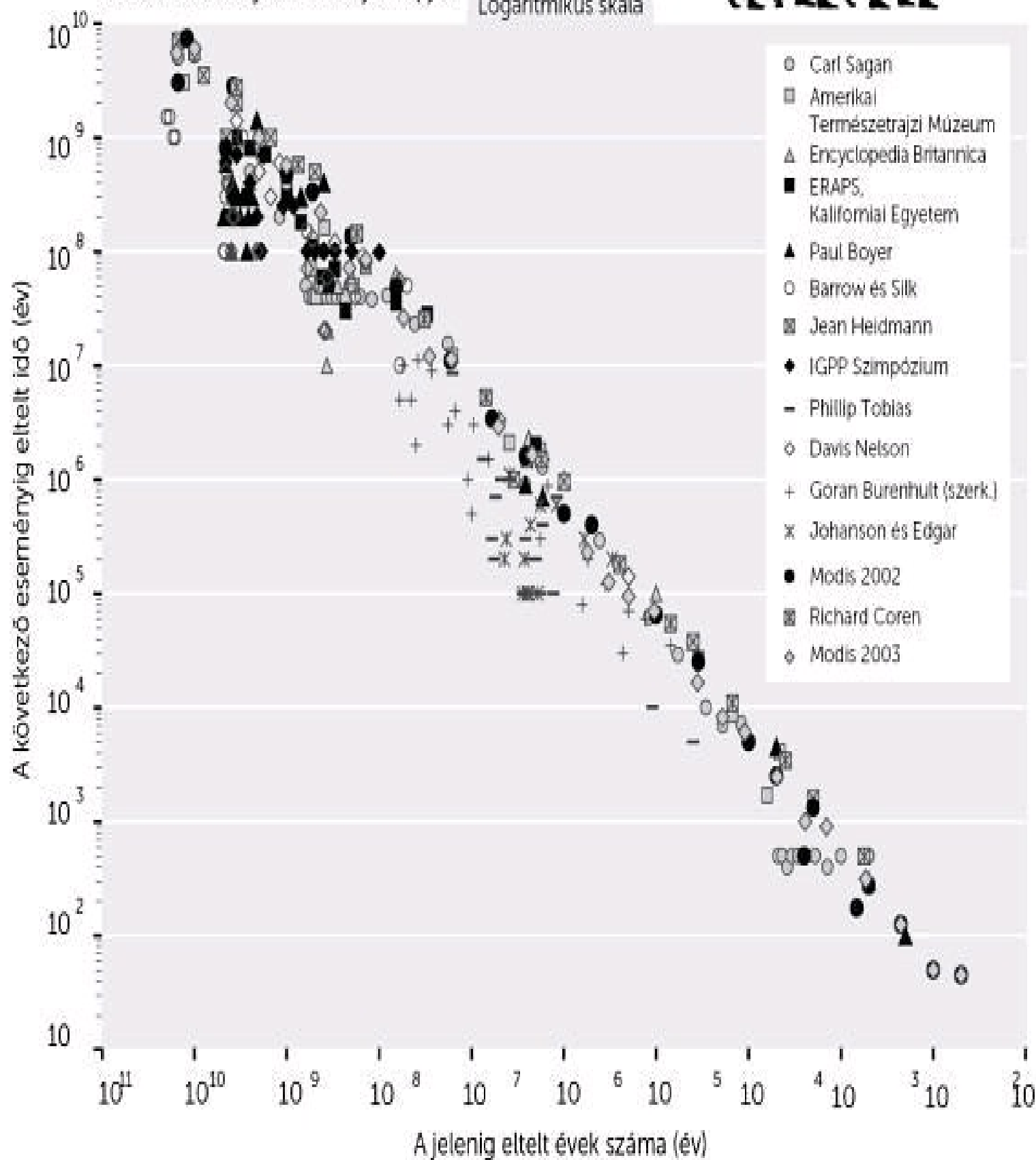
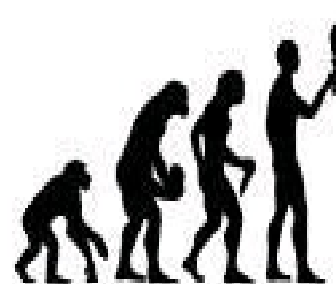


A fenti ábrák a biológiai és technológiai történelem általam legfontosabbnak tartott fejleményeit ábrázolják. Figyeljük meg, hogy az evolúció folyamatos gyorsulását bemutató egyenes vonal nem függ attól, hogy milyen eseményeket választunk ki! Sok kutató és kézikönyv állított össze listát a biológiai és technológiai evolúció fontos eseményeiről, és mindegyiknek megvan a maga egyéni sajátossága. Ám a megközelítések sokfélesége ellenére, ha több forrásra (például az *Encyclopaedia Britannica*-ra, az amerikai Természettudományi Múzeumra, Carl Sagan „ kozmikus naptárjára” és egyebekre) támaszkodva összeállítunk egy listát, ugyanezt az egyenletes gyorsulást figyelhetjük meg. A következő oldalon lévő ábra a kulcsesemények tizenöt különböző listáját^[18] kombinálja. Mivel az egyes kutatók más és más dátumokat rendelnek ugyanazokhoz az eseményekhez, és a különböző listák hasonló, vagy azonos eseményeket sorolnak fel más-más kritériumok alapján kiválasztva, az adatok „zajossága” (statisztikai varianciája) miatt a trendvonal „megvastagodik”, ahogyan arra számítani is lehet. Az általános trend azonban nagyon jól látható.

Paradigmaváltások

a kulcsesemények 15 listája alapján

Logaritmikus skála

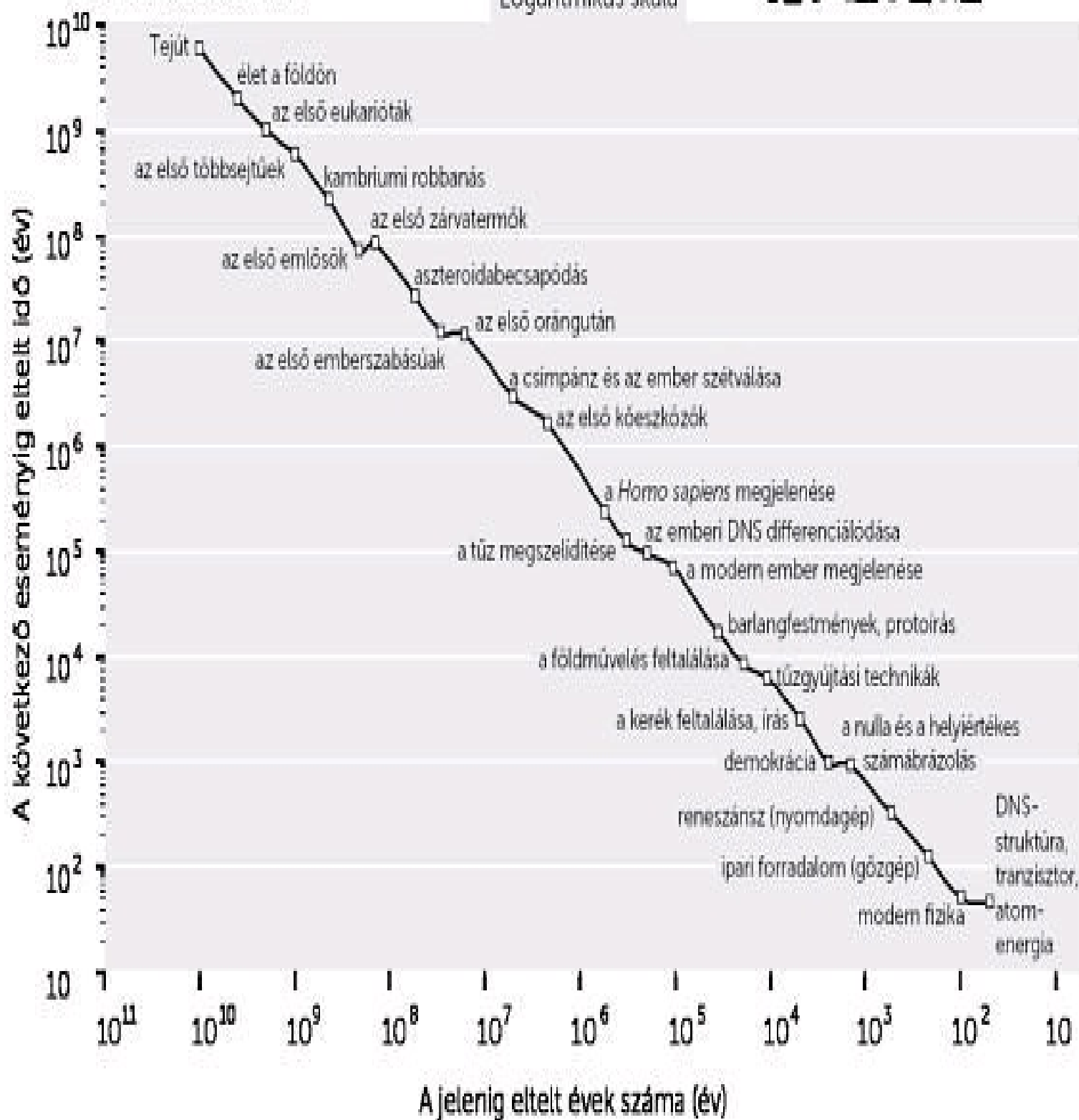
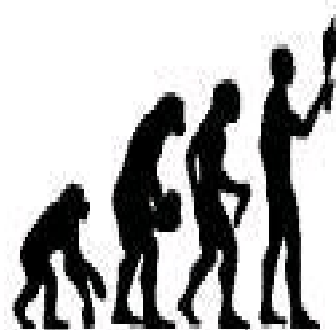


Tizenöt nézet az evolúcióról: nagyobb paradigmaváltások a világtörténelemben, a kulcsesemények tizenöt különböző listája szerint. Egyértelműen látszik az egyenletes gyorsulás trendje a biológiai, majd a technológiai evolúcióban.

A kanonikus mérőföldkövek tizenhárom lista eseménycsoportjai alapján: Theodore Modis fizikus és komplexitásteoretikus elemezte ezeket a listákat, és a különböző listák azonos, hasonló és/vagy kapcsolatban lévő eseményeinek alapján meghatározott huszonnyolc eseménycsoportot (amelyeket kanonikus mérőföldköveknek nevezett el).^{[\[19\]](#)} Ezzel gyakorlatilag eltávolította a „zajt” (például a dátumok eltérését az egyes listákon), ismét csak ugyanazt az előrehaladást tárva fel:

Kanonikus mérőöldkövek

Logaritmus skála



Ezen az ábrán két jellemző növekszik exponenciálisan: a rendezettség és a komplexitás, amikről a következő fejezetben fogunk részletesen szólni. Ez a gyorsulás megfelel a józan ész megfigyeléseinek. Egymilliárd évvel ezelőtt nem sok minden történt akár egymillió év leforgása alatt sem. Am negyedmillió évvel ezelőtt korszakos jelentőségű események – például fajunk evolúciója – következtek be alig százezer éven belül. A technológiában, ha visszamegyünk ötvenezer évet, nem sok minden történt ezer év alatt. Ám a közelmúltban azt látjuk, hogy az új paradigmák, például a világháló, egyetlen évtized alatt eljutnak a gondolattól a tömeges alkalmazásig (azaz a fejlett országokban a népesség egynegyede használja őket).

Ötödik korszak: az emberi technológia és az emberi intelligencia egybeolvadása. Néhány évtizeddel előretekintve, a szingularitás az ötödik korszakkal fog elkezdődni. Az fogja létrehozni, hogy az agyunkba ágyazott hatalmas mennyiségű tudás egybeolvad a technológiánk nagyságrendekkel nagyobb kapacitásával, sebességével és tudásmegosztó képességével. Az ötödik korszak lehetővé teszi ember–gép-civilizációknak, hogy meghaladja az emberi agyban lévő idegsejtek mindössze százbillió, rendkívül lassú kapcsolata jelentette korlátokat.^[20]

A szingularitás lehetővé fogja tenni, hogy évszázados emberi problémákat oldjunk meg, és óriási mértékben felerősítsük az emberi kreativitást. Meg fogjuk őrizni és fel fogjuk javítani az evolúció által ránk ruházott intelligenciát, és közben legyőzzük a biológiai evolúció komoly korlátait. Ám a szingularitás felerősíti majd azt a képességünket is, hogy kiéljük destruktív hajlamainkat, tehát a teljes történet még közel sem íratott meg.

Hatodik korszak: a világegyetem ébredése. Ezt a témát a 6. fejezetben, *...a kozmosz intelligens sorsára* című részben fogom kifejteni. A szingularitás után a biológiai (emberi agy) és technológiai (emberi zsenialitás) gyökerekből származó intelligencia elkezd majd teljesen átítatni az anyagot és az energiát. Ehhez át fogja szervezni ezeket, hogy optimális szintű számítási kapacitást (ami olyan korlátokon alapul, amelyeket a 3. fejezetben fogunk tárgyalni) biztosítsanak ahhoz, hogy elterjedjen szülőhelyéről, a Földről.

Jelenleg a fénysebességet tartjuk az információtovábbítás korlátozó tényezőjének. Ennek a korlátnak a megkerülését kénytelenek vagyunk nagyon spekulatívnak tartani, de vannak bizonyos arra utaló jelek, hogy talán mégis le lehet győzni.^[21] Ha lesznek is kisebb tévutak, végül szert fogunk tenni a fénysebesség túllépésének képességére. Az, hogy a civilizációnk lassan vagy gyorsan oltja-e be a világegyetem többi részét kreativitásával és intelligenciájával, e korlát megváltoztathatóságán múlik. Akárhogy is, a világegyetem „buta” anyaga és mechanizmusai át fognak alakulni az intelligencia rendkívül fenséges formáivá, melyek az információmintázatok evolúciójának hatodik korszakát fogják alkotni.

Ez a szingularitás és a világegyetem végső sorsa.

A szingularitás küszöbén

*„Tudod, nagyon mások lesznek a dolgok!... Nem, nem, úgy értem, tényleg mások!”
(Mark Miller komputertudós Eric Drexlernek, 1986 körül)*

„Mik a következményei ennek az eseménynek? Amikor emberfeletti intelligencia hajtja a fejlődést, az sokkal gyorsabb lesz. Ami azt illeti, semmi sem szól az ellen, hogy magának a fejlődésnek ne lenne része a még intelligensebb entitások teremtése – még rövidebb idő alatt. A legjobb analógia, amit látok, a múltbéli evolúció: az állatok képesek alkalmazkodni a problémákhoz és újításokkal előállni, de gyakran nem gyorsabban, mint ahogy a természetes kiválasztódás elvégzi a munkáját – a természetes kiválasztódás esetében a világ a saját ösztönzőjeként viselkedik. Mi, emberek képesek vagyunk internalizálni a világot, és „Mi lenne, ha...?” kérdéseket feltenni a fejünkben; sok problémát sok ézerszer gyorsabban meg tudunk oldani, mint a természetes kiválasztódás. Na már most, ha olyan eszközöket teremtünk, amelyek sokkal gyorsabban hajtják végre ezeket a szimulációkat, akkor a környezet, amelybe kerülünk, olyan radikálisan fog különbözni az emberiség múltjától, mint amennyire maga az emberiség az alacsonyabb rendű állatoktól. Emberi nézőpontból nézve ez a változás az összes korábbi szabály eldobását fogja jelenteni, talán egyetlen szempillantás alatt; exponenciális kitörést, amelynek az irányítását nem is remélhetjük.”

*(Vernor Vinge: The Technological Singularity
[A technológiai szingularitás], 1993)*

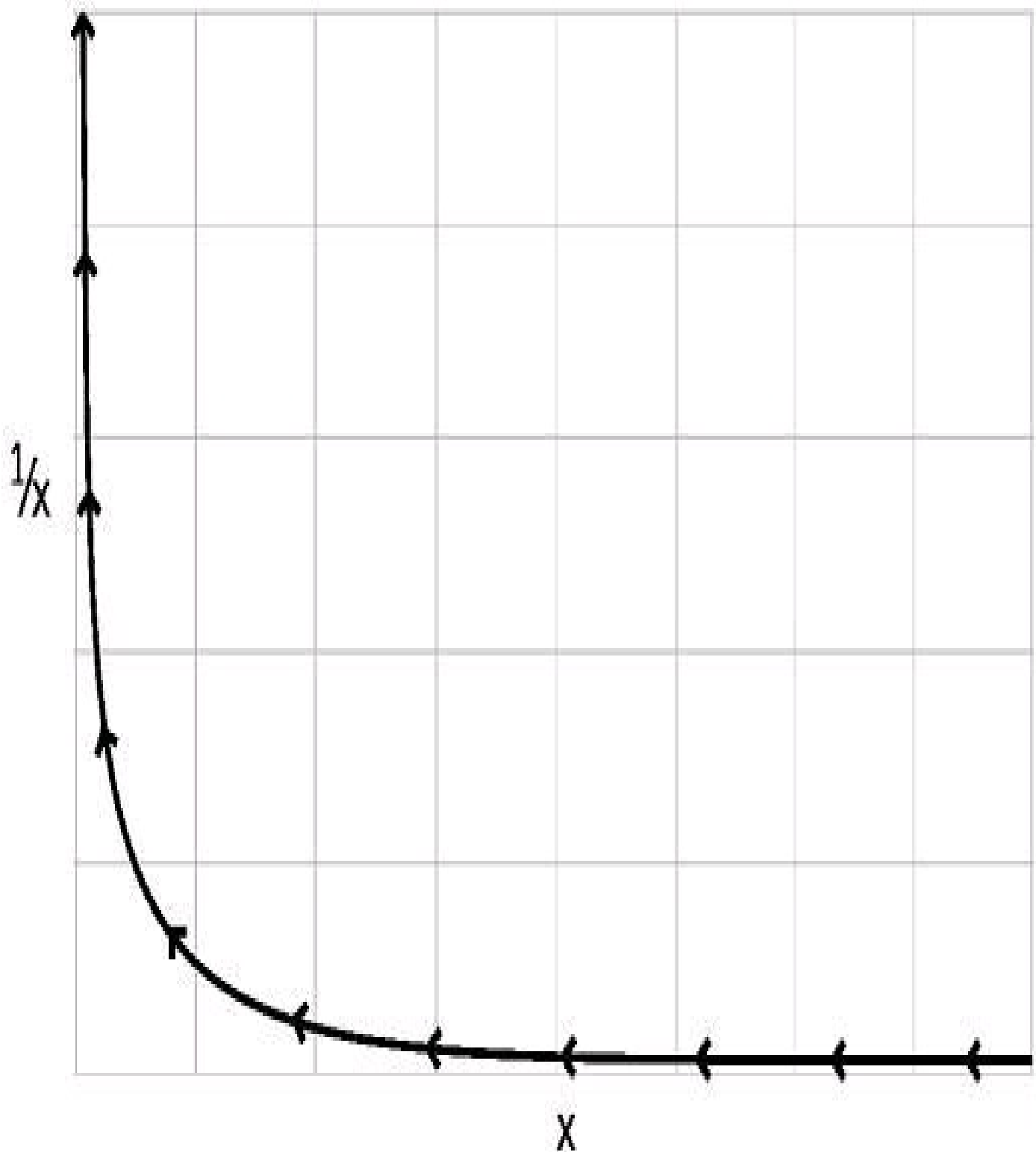
Definiáljuk az ultraintelligens gépet úgy, mint olyan gép, amely a legokosabb ember szellemi tevékenységét is képes messze meghaladni! Mivel a gépek tervezése is ezek közé a szellemi tevékenységek közé tartozik, az ultraintelligens gép még jobb gépeket tud tervezni; azaz kétségkívül bekövetkezik az „intelligenciarobbanás”, és az ember intelligenciája lemarad. Így az első ultraintelligens gép lesz az ember utolsó találmánya.

*(Irving John Good:
Speculations Concerning the First Ultraintelligent Machine
[Elmélkedések az első ultraintelligens gépről], 1965)*

A szingularitás fogalmának tágabb perspektívába helyezéséhez vizsgáljuk meg magának a szónak a történetét. A „szingularitás” egy egyedi eseményt jelöl, amelynek egyedülálló következményei vannak. A matematikusok azt az értéket jelölik a szóval, amely túllép minden véges korláton. Például azt a nagyságrendváltozást, amely akkor keletkezik, amikor egy állandót egy olyan számmal osztunk el, amely egyre közelebb kerül a nullához. Vegyük szemügyre például az egyszerű $y = 1/x$ függvényt! Ahogy az x értéke közelít a nullához, a függvény (y) robbanásszerűen egyre nagyobb értéket vesz fel.

Matematikai szingularitás

Lineáris skála



Matematikai szingularitás: ahogy az x értéke közelít a nullához (jobbról balra), az $1/x$ (vagy y) függvény végtelenhez közelít.

Az ilyen matematikai függvények igazából soha nem érnek el végtelen értéket, mivel a nullával való osztás matematikailag „nem definiált” (lehetetlen kiszámolni az eredményét). Az y értéke azonban meghalad minden lehetséges véges értéket (közelít a végtelenhez), ahogy az x osztó közelít a nullához.

Egy másik tudományterület, amely használja a szót, az asztrofizika. Ha egy nagy tömegű csillag szupernóva-robbanáson megy át, a maradéka végül egy látszólag nulla kiterjedésű és végtelen sűrűségű pontban zuhan össze, és a középpontjában létrejön egy „szingularitás”. Mivel úgy vélték, hogy a végtelen sűrűség elérése után még a fény sem képes elhagyni a csillagot,^[22] fekete lyuknak nevezték el.^[23] Szakadást jelent a téridő szövetében.

Az egyik elmélet szerint az egész világegyetem egy ilyen szingularitással kezdődött.^[24] Ám érdekes módon a fekete lyukak eseményhorizontja (felszíne) véges méretű, és a gravitációs erő is csak elméletileg végtelen a fekete lyukak nulla nagyságú középpontjában. Az erők minden mérhető helyen végesek, bár rendkívül nagyok.

Az első hivatkozás a szingularitásra, mint az emberi történelem szövetét felhasítani képes eseményre Neumann János korábban idézett kijelentése. Az 1960-as években I. J. Good „intelligenciarobbanásról” írt, ami annak következménye, hogy az intelligens gépek emberi közreműködés nélkül tervezik meg a következő nemzedéküket. Vernor Vinge, a San Diego-i Állami Egyetem matematikusa és számítógéptudósa az *Omni* magazinnak írt 1993-as cikkében, illetve a *Marooned in Realtime* (A valós időben rekedve) című tudományos-fantasztikus regényében (1986) a sebesen közelgő „technológiai szingularitásról” ír.^[25]

1989-es könyvem, a *The Age of Intelligent Machines* (Az intelligens gépek kora) olyan jövőt mutat be, ami a XXI. század első felében elkerülhetetlenül az emberi intelligenciát nagymértékben meghaladó gépek felé tart.^[26] Hans Moravec 1988-as *Mind Children*je (Az elme gyermekei) hasonló következtetésre jutott a robotika fejlődésének elemzésével.^[27] 1993-ban Vinge tartott egy előadást egy, a NASA által szervezett szimpóziumon, amelyben a szingularitást közelgő, elsősorban „az emberinél nagyobb intelligenciával rendelkező entitások” – Vinge ezt tartotta az elszabaduló jelenségek előfutárának – megjelenésének következtében megvalósuló eseménynek nevezte.^[28] 1999-es, a *The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence* (A spirituális gépek kora: amikor a számítógépek meghaladják az emberi intelligenciát) című könyvemben a biológiai intelligenciánk és az általunk folyamatosan teremtett mesterséges intelligencia közötti, egyre szorosabb kapcsolatról írtam.^[29] Hans Moravec könyve, a *Robot: Mere Machine to Transcendent Mind* (Robot: a pusztá géptől a transzcendens tudatig), amely szintén 1999-ben jelent meg, „evolúciós örököseinknek” nevezi a 2040-es évek robotjait, olyan gépeknek, amelyek „belőlünk nőnek ki, elsajátítják az ismereteinket, magukévá teszik céljainkat és értékeinket... a mi elménk gyermekei lesznek.”^[30] Damien Broderick ausztrál tudós 1997-ben és 2001-ben megjelent *The Spike* (A túske) című könyve a technológiai gyorsulás néhány évtizeden belül várható extrém szakaszának mindent átható hatásait elemzi.^[31] John Smart egy sor írásában mutatta be a szingularitást az általa angol betűszóval „MEST” (anyag, energia, tér és idő) összetömörülésének nevezett dolog elkerülhetetlen következményeként.^[32]

Véleményem szerint a szingularitásnak sok arca van. Az exponenciális növekedésnek azt a szinte függőleges szakaszát jelöli, ami akkor alakul ki, amikor a sebesség olyan szélsőségesse válik, hogy a technológia látszólag végtelen sebességgel fejlődik. Matematikai szempontból persze nincs diszkontinuitás, nincs hasadás, a növekedés sebessége véges, bár rendkívül nagy marad. Ám *jelenlegi*, korlátozott nézőpontunkból ez a közelgő esemény éles és hirtelen törésnek tűnik a fejlődés folyamatosságában. Azért hangsúlyozom a *jelenlegi* szót, mert a szingularitás egyik

szembeszökő következménye a megértésre való képességünk jellegének változása lesz. Sokkal okosabbak leszünk, ahogy egygé olvadunk a technológiánkkal.

Képes-e a technológiai fejlődés korlátlanul felgyorsulni? Van-e olyan pont, amin túl az emberek nem képesek elég gyorsan gondolkodni ahhoz, hogy lépést tartsanak? A közönséges emberek esetében egyértelműen igen a válasz. De vajon mit érhetne el ezer tudós, akik mind ezerszer intelligensebbek és ezerszer gyorsabbak, mint a mai tudósok (mert alapvetően nem biológiai agyuk sokkal gyorsabban dolgozza fel az információt)? Nekik egy naptári év egy egész évezreddel érne fel.^[33] Mivel állnának elő?

Nos, részben olyan technológiákkal, amelyektől még intelligensebbek lesznek (mivel az intelligenciájuk kapacitása már nem rögzített). Megváltoztatnák saját gondolkodási folyamataikat, hogy még gyorsabban gondolkodhassanak. Amikor pedig a tudósok milliószer intelligensebbek lesznek, és milliószer gyorsabban gondolkodnak, egy óra egy évszázad fejlődésének felel majd meg (mai mértékkel mérve).

A szingularitás a következő alapelvekre épül, amelyeket sorra veszek, kifejtek, elemzek és végiggondolok a könyv hátralévő részében:

- A paradigmaváltás (technikai innováció) sebessége nő, jelenleg minden évtizedben megduplázódik.^[34]
- Az információtechnológia ereje (ár–teljesítmény-aránya, sebessége, kapacitása és sávszélessége) még gyorsabb exponenciális ütemben nő, jelenleg körülbelül évente megduplázódik.^[35] Ez az elv sok mérhető területre, köztük az emberi tudás mennyiségére is vonatkozik.
- Az információtechnológiában az exponenciális növekedésnek megfigyelhető egy második szintje is, magának az exponenciális növekedésnek az üteme (az exponens) is exponenciálisan nő. Az ok: ahogy a technológia egyre költséghatékonyabb lesz, úgy egyre több forrást fordítanak a fejlesztésére, aminek következtében az idő múlásával növekszik az exponenciális növekedés sebessége. Például az 1940-es években a számítógépipar maroknyi, ma már csak történelmi szempontból fontos projekt alkotta. Ma a számítógépipar teljes forgalma több mint egybillió dollár, s így a kutatási-fejlesztési ráfordítások is sokkal magasabbak.
- Az exponenciálisan fejlődő technológiák egyike az emberi agy feltérképezése. Ahogyan azt a 4. fejezetben tárgyalni fogom, az agy kutatására használt képalkotó berendezések idő- és térbeli felbontása, illetve sávszélessége évente megduplázódik. Épp most kerülnek a birtokunkba azok az eszközök, amelyek ahhoz szükségesek, hogy megkezdjük az emberi agy működési elveinek komoly visszafejtését (dekódolását). Az agy több száz területe közül néhány tucatról már most rendelkezésünkre állnak lenyűgöző modellek és szimulációk. Két évtizeden belül az emberi agy összes területéről tudni fogjuk, hogyan működik.
- Ennek az évtizednek a végére rendelkezésünkre fog állni a szükséges hardver, hogy szuperszámítógépekkel emuláljuk az emberi intelligenciát, a következő évtized végére pedig ugyanez személyi számítógép méretű berendezésekkel is lehetségessé válik. A 2020-as évek közepére elkészülnek az emberi intelligencia működő szoftvermodelljei.
- Miután rendelkezésre áll az emberi intelligencia teljes emulálásához szükséges hardver és szoftver, számíthatunk rá, hogy a 2020-as év végére a számítógépek átmennek a Turing-teszten, azaz az intelligenciájuk megkülönböztethetetlen lesz a biológiai emberekétől.^[36]
- Amikor a számítógépek eléri ezt a fejlettségi szintet, képesek lesznek egyesíteni az emberi intelligencia hagyományos erősségeit a gépi intelligencia erősségeivel.

- Az emberi intelligencia hagyományos erősségei közé tartozik a mintázatok felismerésének képessége. Az emberi agy, masszívan párhuzamos és önszervező jellege miatt, ideális architektúra a finom, invariáns jellemzőkön alapuló mintázatok felismeréséhez. Az ember arra is képes, hogy alkalmazza a felismeréseit, és a tapasztalatai alapján, beleértve a nyelv révén szerzett információt is, törvényszerűségeket határozzon meg. Az emberi intelligencia egyik kulcsfontosságú tulajdonsága az a képesség, hogy mentális modelleket alkosson a valóságról, és mentális „Mi lenne, ha...?”-kísérleteket folytasson ezen modellek különféle módosításaival.
- A gépi intelligencia hagyományos erősségei közé tartozik az a képesség, hogy pontosan emlékezzen több milliárd tényre, és azonnal felidézze azokat.
- A nem biológiai intelligencia egy másik előnye az, hogy ha egy gép elsajátít egy képességet, akkor nagy sebességgel, optimális pontossággal és kifáradás nélkül képes többször végrehajtani azt.
- S talán a legfontosabb: a gépek rendkívül gyorsan képesek megosztani a tudásukat, szemben az ember nyelvi alapú, nagyon lassú tudásmegosztásával.
- A nem biológiai intelligencia képes lesz képességeket és tudást letölteni más gépekről, és végül az emberektől is.
- A gépek közel fénysebességgel (kb. háromszázmillió méter per szekundum) fogják feldolgozni és cserélni a jeleket, szemben a biológiai eredetű emlősagyak elektrokémiai jeleinek körülbelül száz méter per szekundumos sebességével.^[37] A két sebesség aránya legalább hárommillió az egyhez.
- Az internet révén a gépek hozzá fognak férni emberi–gépi civilizációnk összes tudásához, és képesek lesznek elsajátítani ezt a tudást.
- A gépek képesek egyesíteni erőforrásaikat, intelligenciájukat és emlékezetüket. Két gép – vagy egymillió gép – összekapcsolódhat, egyesülhet, majd ismét szétválhat, vagy akár egyszerre is megtehetik mindkettőt: eggyé válhatnak és elkülönülhetnek. Az emberek ezt szerelemnek nevezik, de a mi biológiai képességünk mulékony és megbízhatatlan.
- Ezeknek a hagyományos erősségeknek (a biológiai eredetű emberi intelligencia mintafelismerő képességének és a nem biológiai intelligencia sebességének, memóriakapacitásának, pontosságának, tudás- és ismeretmegosztó képességének) az egyesítése óriási jelentőségű lesz.
- A gépi intelligencia esetében a dizájn, az architektúra teljesen szabad (azaz nem lesznek biológiai korlátai, mint az idegsejtek közötti kapcsolatok lassúsága vagy a rögzített koponyaméret), és mindig egyenletes teljesítményt fog nyújtani.
- Amikor a nem biológiai intelligenciában egyesülnek az emberek és a gépek hagyományos erősségei, civilizációnk intelligenciájának nem biológiai része továbbra is élvezni fogja azokat az előnyöket, amelyeket a gépek ár–érték-arányának, sebességének és kapacitásának hatványozottan exponenciális növekedése nyújt.
- Amikor a gépek szert tesznek arra a képességre, hogy ugyanúgy tervezzék és fejlesszék a technológiát, mint az emberek, csak éppen sokkal nagyobb sebességgel és kapacitással, akkor hozzá fognak férni a saját tervrajzukhoz (forráskódjukhoz), és képesek lesznek módosítani azt. Az ember jelenleg valami hasonlót tesz a biotechnológia révén (megváltoztatva a biológiánk alapját jelentő genetikai és egyéb információs folyamatokat), ám sokkal lassabban és sokkal korlátozottabb mértékben, mint ahogy a gépek képesek lesznek majd módosítani saját programjaikat.

- A biológiának vannak bizonyos eredendő korlátai. Például minden élő szervezetnek aminosavak szálaiból álló fehérjékből kell állnia. A fehérjealapú mechanizmusok gyengék és lassúak. Képesek leszünk áttervezni biológiai testünk szerveit és rendszereit, valamint agyunkat úgy, hogy sokkal jobb lehetőségekkel rendelkezzenek.
- Amint arra a 4. fejezetben kitérünk majd, az emberi intelligenciának van bizonyos fokú flexibilitása (képes megváltoztatni a saját felépítését); talán nagyobb fokú is, mint korábban hittük. Ám ennek ellenére az emberi agy architektúrája igen korlátolt. Például a koponyánkban mindössze körülbelül százbillió idegsejtek közötti kapcsolatnak van helye. A nagyobb agykéreg és az agy bizonyos területein a nagyobb mennyiségű szürkeállomány kifejlődése kulcsfontosságú genetikai változás volt, mert főemlős őseinknél erőteljesebb kognitív képességekkel ruházott fel minket.^[38] Ez a változás azonban a biológiai evolúció nagy, lassú időskáláján következett be, és még ma is eredendő korlátokat szab az agy képességeinek. A gépek képesek lesznek átalakítani saját felépítésüket és korlátlanul felerősíteni kapacitásukat. A nanoeszközök használata révén a képességeik nagymértékben meg fogják haladni a biológiai agyak képességeit, anélkül, hogy jelentősen megnőne a méretük vagy az energiafogyasztásuk.
- A gépek az igen gyors, háromdimenziós molekuláris áramkörök előnyeit is élvezni fogják. A mai elektronikus áramkörök több mint egymilliószor gyorsabbak az emlősgagy elektrokémiai kapcsolóinál. A holnap molekuláris áramkörei olyan eszközökön fognak alapulni, mint a nanocsövek, amelyek körülbelül tíz atom átmérőjű, parányi, szénatomokból álló hengerek, és ötszázszor kisebbek, mint a mai, szilíciumalapú tranzisztorok. Mivel a jeleknek kisebb távolságot kell megtenniük, képesek lesznek terahertzes (másodpercenként több billió műveletet jelentő) sebességgel működni, szemben a jelenlegi chipek néhány gigahertzével (másodpercenként milliárdnyi művelet).
- A technológiai változás sebessége nem fog az ember szellemi sebességére korlátozódni. A gépi intelligencia olyan visszacsatolási ciklusban fogja fejleszteni a saját képességeit, amit az emberi intelligencia nem fog tudni segítség nélkül követni.
- A gépi intelligencia saját felépítését iteratív módon fejlesztő ciklusa egyre gyorsabb lesz. Tulajdonképpen ezt jelzi előre a paradigmaváltás sebességének folyamatos növekedését leíró képlet. A paradigmaváltás gyorsulásának folyamatosságával szemben felhozott egyik érv az, hogy végül túl gyorsá válik ahhoz, hogy az ember követni tudja, s ennél fogva, szól az érvelés, nem következhet be. Azonban a biológiai intelligenciáról a nem biológaira való áttérés lehetővé teszi majd, hogy a trend folytatódjon.
- A nem biológiai intelligencia gyorsuló fejlődési ciklusával párhuzamosan a nanotechnológia lehetővé fogja tenni, hogy molekuláris szinten befolyásoljuk a fizikai valóságot.
- A nanotechnológia lehetővé fogja tenni nanobotok tervezését: molekuláris szinten tervezett, mikronokban (a méter egymilliomod részében) mérhető robotokét, például a „respirocitákét” (gépi vörös vértestekét).^[39] A nanobotoknak miriádnyi szerepük lesz az emberi testben, köztük az öregedés megfordítása (feltéve, hogy ezt a feladatot nem oldja meg addig a biotechnológia, például a génmódosítás segítségével).
- A nanobotok a biológiai idegsejtekkel kapcsolatba lépve ki fogják tágítani az emberi tapasztalás határait azzal, hogy közvetlenül az idegrendszeren belül hoznak létre virtuális valóságot.
- Az agy hajszálereibe kerülő több milliárd nanobot óriási mértékben ki fogja tágítani az

emberi intelligenciát is.

- Amint megveti a lábát a nem biológiai intelligencia az emberi agyban (ez már elkezdődött a számítógépes neurális implantátumokkal), a gépi intelligencia exponenciálisan megnövekszik az agyunkban (ahogyan tette azt eddig is), és legalább megkétszerezi a teljesítményét minden évben. Ezzel szemben a biológiai intelligencia kapacitása gyakorlatilag rögzített. Ennélfogva intelligenciánkban végső soron a nem biológiai rész lesz az uralkodó.

- A nanobotok a környezetet is javítani fogják azzal, hogy visszafordítják a korábbi iparosodás okozta szennyezések hatásait.

- A kép- és hanghullámok manipulálására képes, *fogletnek* (kb. önszervező nanobotok felhőjének) nevezett nanorobotok el fogják hozni a valódi világba a virtuális valóságok képlékenységet. [\[40\]](#)

- Az érzelmek megértésére és az azokra való adekvát reakciókra való emberi képesség (az úgynevezett érzelmi intelligencia) az emberi intelligencia egyik olyan formája, amelyet a jövőbeli gépi intelligencia is meg fog érteni és el fog sajátítani. Érzelmi reakcióink egy része arra van hangolva, hogy optimalizálja korlátolt és törékeny biológiai testünk által behatárolt intelligenciánkat. A jövő gépi intelligenciájának szintén lesz „teste” (például virtuális testek a virtuális valóságban, vagy a *fogletek* révén a valódi világban létrehozott kivetítések), hogy kölcsönhatásba léphessenek a világgal, de ezek a nanogépezetek alkotta testek sokkal tartósabbak lesznek, több mindenre képesek, mint a biológiai emberi testek. Ennélfogva a jövőbeli gépi intelligencia bizonyos „érzelmi” reakciói újra lesznek tervezve, hogy tükrözzék az óriási mértékben megnövekedett fizikai képességeiket. [\[41\]](#)

- Ahogy az idegrendszeren belüli virtuális valóság a felbontás és a hihetőség tekintetében a valódi valóság versenytársává válik, a tapasztalataink egyre nagyobb része helyeződik át a virtuális környezetekbe.

- A virtuális valóságban mind testileg, mint érzelmileg más emberek lehetünk. Sőt mások (például a partnereink) más testet választhatnak nekünk, mint amit mi választanánk magunknak (és fordítva).

- A gyorsuló megtérülések törvénye mindaddig fenn fog állni, amíg a biológiai intelligencia „át nem itatja” ember–gép-intelligenciánkkal a világegyetemben közelünkben lévő anyagot és energiát. Az „átítatás” alatt azt értem, hogy a számítások fizikájáról szerzett ismereteink alapján optimális mértékben kihasználja az anyag- és energiamintázatokat a számításokhoz. Ahogy közelebb kerülünk ehhez a határhoz, civilizációnk intelligenciájának tovább fognak bővülni a képességei, miközben továbbterjeszkedik a világegyetemben. Ennek a terjeszkedésnek a sebessége hamar el fogja érni az információ utazásának maximális sebességét.

- Végül az egész világegyetemet át fogja itatni az intelligenciánk. Ez a világegyetem sorsa. (Lásd: 6. fejezet.) Mi fogjuk meghatározni a saját sorsunkat; nem fogjuk hagyni, hogy az égi mechanikát jelenleg uraló „buta”, egyszerű, gépies erők határozzák meg azt.

- Az, hogy mennyi idő alatt válik az egész világegyetem intelligenssé, nagymértékben függ attól, hogy a fénysebesség túlléphető korlát-e. Egyes jelek arra utalnak, hogy ez alól a korlát alól vannak kivételek (vagy, hogy megkerülhető ez a korlát), és ha valóban így van, akkor a civilizációnk jövőbeli, óriási intelligenciája képes lesz feltárni ezeket.

Ez tehát a szingularitás. Egyesek talán azt mondják, hogy nem tudjuk felfogni, legalábbis a jelenlegi tudásszintünkkel nem, és így túl sem pillanthatunk az eseményhorizontján, nem érthetjük meg teljesen,

ni van azon túl. Többek között ezért nevezzük ezt az átalakulást éppen szingularitásnak.

Én a magam részéről nehéznek találtam, bár nem lehetetlennek, hogy túltekintsek ezen az eseményhorizonton, még azután is, hogy évtizedeken át gondolkodtam rajta és a következményein. Mégis az a véleményem, hogy gondolkodásunk komoly korlátai ellenére elég jó az absztrakciós készségünk ahhoz, hogy értelmes kijelentéseket tegyünk a szingularitás utáni életről. Nagyon fontos, hogy a kialakuló intelligencia továbbra is az emberi civilizációt fogja képviselni, ami már most emberi–gépi civilizáció. Más szóval, a jövő gépei emberek lesznek, még ha nem is biológiai emberek. Ez lesz az evolúció következő lépése, a következő magas szintű paradigmaváltás, a közvetett hatás következő szintje. Civilizációnk intelligenciájának nagy része végül nem biológiai lesz. Ennek a századnak a végére billiószor billiószor erősebbé válik, mint bármilyen emberi intelligencia.^[42] Ugyanakkor, hogy a sokszor hangoztatott aggodalmakra is reagáljak, ez nem jelenti a biológiai intelligencia végét, még ha le is kerül az evolúciós felsőbbrendűség trónjáról. Még a nem biológiai formák is biológiai mintákból fognak származni. A civilizációnk emberi marad – sőt sok szempontból sokkal jobban fogja példázni azt, amit emberinek tartunk, mint ma, bár maga a kifejezés is túl fog lépni biológiai eredetén.

Sok kutató figyelmeztet az emberi intelligenciánál magasabb rendű nem biológiai intelligencia kialakulásának veszélyeire (a problémára visszatérünk még a 9. fejezetben). Az a lehetőség, hogy saját intelligenciánkat is felerősítheti, ha szoros kapcsolatba lépünk más gondolkodó rétegekkel, nem feltétlenül enyhíti az aggodalmat, hiszen sokan adtak hangot azon kívánságuknak, hogy „feljavíthatlanok” maradjanak, és egyúttal megőrizték helyüket a szellemi tápláléklánc csúcsán. A biológiai emberiség szempontjából ezek az emberfeletti intelligenciák hű szolgálóknak fognak tűnni: a szükségleteink és vágyaink kielégítésére fognak törekedni. Ám a nagy becsben tartott biológiai ősök kívánságainak teljesítése csak töredékét fogja lekötni annak a szellemi erőnek, amit a szingularitás fog elhozni.

MOLLY KB. 2004-BŐL: *Honnan fogom tudni, hogy itt a szingularitás? Úgy értem, kellene egy kis idő a felkészülésre.*

RAY: *Miért, mit akarsz csinálni?*

MOLLY 2004: *Nézzük csak, először is feljavítanám egy kicsit az önéletrajzomat. Jó benyomást szeretnék tenni a leendő hatalomra.*

GEORGE KB. 2048-BŐL: *Ezt elintézhetem neked.*

MOLLY 2004: *Ó, igazán nem szükséges. Én is meg tudom csinálni. Talán még néhány iratot is szívesen eltüntetnék... tudod, amelyekben talán kissé sértően fogalmaztam néhány géppel kapcsolatban, amiket ismertem.*

GEORGE 2048: *Hát, a gépek úgyis megtalálják őket... de ne aggódj, nagyon megértőek vagyunk!*

MOLLY 2004: *Valahogy nem nyugodtam meg teljesen ettől. De akkor is szeretném tudni, mik lesznek az előjelek.*

RAY: *Oké. Amikor egymillió e-mailt találsz a postaládádban, valószínűleg közeleg a szingularitás.*

MOLLY 2004: *Hm, hát akkor nemsokára itt lesz. De komolyan, alig bírom követni ezt a rengeteg dolgot, ami rám zúdul! Hogy fogok lépést tartani a szingularitással?*

GEORGE 2048: *Lesznek virtuális asszisztenseid... illetve tulajdonképpen csak egyre lesz szükséged.*

MOLLY 2004: *Ami, gondolom, te leszel?*

GEORGE 2048: *Állok szolgálatodra.*

MOLLY 2004: *Ez remek. Te majd gondoskodsz mindenről, még szólnod sem kell nekem. „Ó, ne zavarjuk ezzel Mollyt, úgysem értené meg, hadd maradjon csak a boldog tudatlanságban!”*

GEORGE 2048: *Ó, nem, erről szó sem lehet!*

MOLLY 2004: *Mármint a boldogságról?*

GEORGE 2048: *A tudatlanságról. Képes leszel megérteni, hogy mit csinálok, ha igazán akarod.*

MOLLY 2004: *Hogyan? Azzal, hogy...?*

GEORGE 2048: *Feljavítottá válsz?*

MOLLY 2004: *Igen, ezt próbáltam mondani.*

GEORGE 2048: *Nos, ha a lehető legjobb kapcsolatot akarjuk, akkor nem lenne rossz ötlet.*

MOLLY 2004: *És ha ilyen szeretnék maradni, amilyen vagyok?*

GEORGE 2048: *Én minden körülmények között hű maradok hozzád. De lehetnék több is, mint a transzcendens szolgád.*

MOLLY 2004: *Az sem hangzik rosszul, ha „csak” a transzcendens szolgám vagy.*

CHARLES DARWIN: *Ha szabad közbeszólnom... eszembe jutott, hogy ha a gépi intelligencia meghaladja az emberit, akkor abba a helyzetbe kerül, hogy képes megtervezni a saját következő nemzedékét.*

MOLLY 2004: *Ez egyáltalán nem példátlan. Már ma is gépekkel tervezik a gépeket.*

CHARLES: *Igen, de 2004-ben még mindig emberi tervezők irányítják a gépeket. Ha a gépek emberi szinten működnek, akkor, mondhatni, a kör bezárul.*

NED LUDD: ^[43] *Az emberek pedig kikerülnek a körből.*

MOLLY 2004: *Ez akkor is nagyon lassú folyamat lesz.*

RAY: *Ó, egyáltalán nem! Ha egy nem biológiai intelligenciát az emberi agy mintájára építenének fel, akár a 2004-ben létező áramkörökből, akkor az...*

MOLLY 2004: *Úgy érted, „ő”.*

RAY: *Igen, persze... ő... legalább egymilliószer gyorsabban tudna gondolkodni.*

TIMOTHY LEARY: *Azaz kitágulna a szubjektív idő.*

RAY: *Pontosan.*

MOLLY 2004: *Az elég sok szubjektív időnek tűnik. Mit fogtok kezdeni ti, gépek, ennyi idővel?*

GEORGE 2048: *Ó, rengeteg dolgunk van! Végül is hozzáférék a teljes emberi tudásanyaghoz az interneten.*

MOLLY 2004: *Csak az emberi tudáshoz? Mi van a gépi tudással?*

GEORGE 2048: *Mi szeretjük egy civilizációnak tekinteni a kettőt.*

CHARLES: *Tehát úgy tűnik, a gépek valóban fejleszteni fogják saját magukat.*

MOLLY 2004: *Ezt már mi, emberek is elkezdjük.*

RAY: *De még csak néhány apró részlettel bajlódunk. A DNS-alapú intelligencia eredendően nagyon lassú és korlátolt.*

CHARLES: *A gépek tehát nagyon gyorsan meg fogják tervezni a következő nemzedéküket.*

GEORGE 2048: *Igen, 2048-ban valóban ez a helyzet.*

CHARLES: *Erre akartam kilyukadni: itt egy új evolúciós vonal bukkant fel.*

NED: *Nekem inkább valami bizonytalan, önmagát gerjesztő jelenségnek tűnik.*

CHARLES: *Az evolúció alapvetően az.*

NED: *De milyen lesz a gépek és az elődeik kapcsolata? Arra gondolok, hogy nem szeretnék az útjukba kerülni. Az 1800-as évek elején el tudtam rejtőzni néhány évig az angol hatóságok elől, de attól tartok, ezekkel nehezebb dolgom lesz...*

GEORGE 2048: *Fiúk...*

MOLLY 2004: *Elbújni az elől a sok apró robot elől...*

RAY: *Mármint nanobotok elől.*

MOLLY 2004: *Igen, az biztos, hogy a nanobotok elől nehéz lesz elrejtőzni.*

RAY: *Szerintem a szingularitásból kiemelkedő intelligencia nagy tisztelettel fog tekinteni biológiai őseire.*

GEORGE 2048: *Pontosan. Nem is pusztán tisztelettel, hanem... áhítattal.*

MOLLY 2004: *Ez remek, George! Tehát az áhítattal tisztelt kis háziállatod leszek. Nem mondhatnám, hogy erre vágytam.*

NED: *Pontosan, ahogy Ted Kaczynski mondta: házi kedvencekké válunk. Ez a sorsunk: elégedett ölebek leszünk, de biztos, hogy nem szabad emberek.*

MOLLY 2004: *És mi van ezzel a hatodik korszakkal? Ha biológiai maradok, nagyon pazarlóan fogom felhasználni a drága anyagot és energiát. Biztos át akartok majd változtatni milliárdnyi virtuális Mollyvá és George-dzsá, akik mindegyike sokkal gyorsabban gondolkodik, mint én. Én úgy látom, elég nagy lesz a nyomás, hogy átigazoljunk a másik oldalra.*

RAY: *Nem, te csak egy parányi töredéke vagy a rendelkezésre álló anyagnak és energiának. Ha megmaradsz biológiaiainak, azzal nem fogod számottevően megváltoztatni a szingularitás számára hozzáférhető anyag és energia mennyiségének nagyságrendjét. Sőt, nagyon is kifizetődő lesz megtartani a biológiai örökséget.*

GEORGE 2048: *Pontosan.*

RAY: *Mint ahogy manapság mi is próbáljuk megóvni az esőerdőket meg a fajok sokszínűségét.*

MOLLY 2004: *Épp ettől félttem. Hiszen milyen remek munkát végzünk az esőerdőkkel is! Talán maradt még belőlük valamennyi. Úgy fogjuk végezni, mint a veszélyeztetett fajok.*

NED: *Vagy mint a kihaltak.*

MOLLY 2004: *És most nem csak rólam van szó. Mi van mindazzal, amit használok? Rengeteg dolgot elhasználok.*

GEORGE 2048: *Nem gond, egyszerűen majd újrahasznosítjuk az anyagokat. Létrehozzuk azt a környezetet, amire szükséged van.*

MOLLY 2004: *Ó, a virtuális valóságban létezem majd?*

RAY: *Nem, hanem a fogletvalóságban.*

MOLLY 2004: *Ködben fogok élni?*^[3]

RAY: *Nem, nem, fogletek között.*

MOLLY 2004: *Ezt nem értem.*

RAY: *Később majd elmagyarázom a könyvben.*

MOLLY 2004: *Csak pár szóban...*

RAY: *A fogletek nanobotok... sejt nagyságú robotok... amelyek egymással összekapcsolódva bármilyen fizikai struktúrát létrehozhatnak. Ezenkívül képesek vizuális és hanginformációkat is közvetíteni, s így elhozzák a virtuális valóság képlekenységét a valódi világba.*³⁸

MOLLY 2004: *Már bánom, hogy megkérdeztem. De jobban belegondolva, nem csak a cuccaimra lesz szükségem. Az állatokat és a növényeket is akarom. Még ha nem is simogatom őket állandóan, szeretem tudni, hogy ott vannak.*

GEORGE 2048: *De hát semmi sem fog elveszni!*

MOLLY 2004: *Tudom, hogy állandóan ezt hajtogatod. De én úgy értem, hogy valóban ott legyenek... tudod, mint a biológiai valóságban!*

RAY: *Ami azt illeti, a teljes bioszféra kevesebb, mint egymilliomod részét teszi ki a Naprendszer anyagának és energiájának.*

CHARLES: *De rengeteg szén van benne.*

RAY: *Akkor is érdemes megtartani az egészet, hogy biztosak lehessünk benne, semmit sem veszítettünk el.*

GEORGE 2048: *Már jó néhány éve ez a közmegegyezés.*

MOLLY 2004: *Tehát alapvetően minden ott lesz karnyújtásnyira, amire csak szükségem lehet?*

GEORGE 2048: *Pontosan.*

MOLLY 2004: *Mint Midász király. Tudod: minden arannyá változott, amihez hozzáért.*

NED: *Igen, és a végén éhen halt.*

MOLLY 2004: *Ha végül mégis átmegyek a másik oldalra, azt hiszem, inkább az unalomba fogok belehalni, azzal a rendelkezésemre álló rengeteg szubjektív idővel.*

GEORGE 2048: *Ó, az nem történhet meg! Majd én gondoskodom róla.*

Második fejezet

A technológia evolúciójának elmélete: a gyorsuló megtérülések törvénye

„Minél messzebbre nézel hátra, annál messzebbre látsz előre.”

(Winston Churchill)

„Kétmilliárd évvel ezelőtt az őseink mikrobák voltak; félmilliárd évvel ezelőtt halak; százmillió évvel ezelőtt egérszerű emlősök; tízmillió évvel ezelőtt fán élő majmok; egymillió évvel ezelőtt pedig a tűz megszelídítésén töprengő előemberek. Az evolúciónk történetét a változások jellemzik. Korunkban a változások sebessége egyre nő.”

(Carl Sagan)

„Pusztán az a dolgunk, hogy létrehozzunk valamit, ami okosabb nálunk; az ezen túl eső problémákat már nem nekünk kell megoldanunk. ...Nincsenek nehéz problémák, csak olyan problémák, amelyeket egy adott intelligenciaszinten nehéz megoldani. Ha egy parányit elmozdulunk felfelé [az intelligenciaszintben], néhány probléma egyszerre átkerül a »lehetetlen« kategóriából a »magától értetődőbe«. Mozduljunk el jelentősebben felfelé, és az összes probléma magától értetődővé válik.”

*(Eliezer S. Yudkowski, Staring into the Singularity
[A szingularitásba meredve], 1996).*

„Gyakran hangoztatják, hogy »a jövőt nem lehet megjósolni.« (...) Azonban... amikor [ez a nézőpont] téves, akkor nagyon téves.”

(John Smart^[44])

A technológia folyamatos fejlődése elkerülhetetlen következménye és eredménye annak, amit én a gyorsuló megtérülések törvényének nevezek. Ez a törvény egy evolúciós folyamat termékeinek exponenciális növekedését és a növekedés sebességét írja le. Ezek közé a termékek közé tartoznak az információhordozó technológiák, mint a számítástechnika, melyeknek gyorsulása jelentősen meghaladja a köztudatban Moore-törvényként ismert tétel előrejelzéseit is. A szingularitás a gyorsuló megtérülések törvényének kerlelhetetlen eredménye, tehát fontos, hogy megvizsgáljuk ennek az evolúciós folyamatnak a jellegét.

A rend jellege. Az előző fejezetben több diagramon ábrázoltuk a paradigmaváltás felgyorsulását. (A paradigmaváltások a feladatok elvégzésére szolgáló módszerek és intellektuális folyamatok jelentősebb változásai, például az írás és a számítógép megjelenése.) A diagramok azt mutatták meg, miket tart tizenöt gondolkodó és kézikönyv a Nagy Bummtól az internetig terjedő időszak biológiai és technológiai evolúciója kulcseseményeinek. Látható rajtuk bizonyos mértékű elvárható szórás, de tisztán felismerhető az exponenciális trend is: a kulcsesemények egyre sűrűbben követik egymást.

Annak a kritériumai, hogy mi számít „kulcseseménynek”, listáról listára változtak, azonban érdemes elgondolkodni az elveken, amelyek alapján választották őket. Egyes kutatók úgy ítélték, hogy az élet, illetve a technika történetének igazán korszakos előrelépései a komplexitás növekedésével

jártak együtt.^[45] Noha valóban úgy tűnik, hogy a megnövekedett komplexitás együtt jár a biológiai és technológiai evolúció előrelépéseivel, én úgy vélem, ez a megállapítás nem teljesen helytálló. Előbb azonban vizsgáljuk meg, mit jelent a komplexitás!

Nem meglepő módon a komplexitás fogalma elég komplex. Az egyik felfogás szerint a komplexitás az egy folyamat ábrázolásához szükséges minimális mennyiségű információ. Tegyük fel, hogy tervezünk egy rendszert (például egy számítógépprogramot vagy egy számítógép digitális tervrajzát), amelyet egy egymillió bitet tartalmazó adatállománnyal lehet leírni. Ekkor azt mondhatnánk, hogy a tervünk komplexitása egymillió bit. De tegyük fel, hogy észrevevessük, hogy az egymillió bitet valójában egy ezerszer ismétlődő ezerbites mintázat alkotja. Jelölhetjük az ismétlődéseket, eltávolíthatjuk az ismétlődő mintázatot, és az egész tervet kifejezhetjük ezer bittel, s így körülbelül ezerszer kisebbre csökkenthetjük az adatállomány méretét.

A legnépszerűbb adattömörítő technikák hasonló módszereket használnak az információn belüli redundancia megkeresésére.^[46] De vajon egy adatállomány ily módon történő tömörítése után teljességgel biztosak lehetünk abban, hogy nincsenek más szabályok vagy módszerek, amik lehetővé tennék, hogy még tömörebben leírjuk az állományt? Például tegyük fel, hogy az állományom egyszerűen a π (3,1415...) volt, egymillió tizedesjegyig leírva. A legtöbb adattömörítő program nem ismeri fel ezt a sorozatot, és a legkisebb mértékben sem tömöríti az egymillió bitet, mivel a pi bináris alakjának bitjei gyakorlatilag véletlenszerűek, és így egyetlen, a véletlenszerűséget vizsgáló teszt szerint sincs ismétlődő mintázatuk.

Ha azonban meg tudjuk határozni, hogy az állomány (vagy egy része) tulajdonképpen a π tartalmazza, könnyen és nagyon tömören le tudjuk írni, csupán annyit kell mondanunk: „ez itt a π egymillió tizedesjegyig”. Mivel soha nem lehetünk biztosak abban, hogy nem siklottunk el egy adott információsorozat még tömörebb ábrázolása fölött, bármekkora tömörítés csak az információ komplexitásának a felső határát adja meg. Murray Gell-Mann ennek a gondolatmenetnek a nyomán definiálja a komplexitást: egy adott információhalmaz „algorithmikus információtartalma (AIC – *algorithmic information content*) annak a legrövidebb programnak a hossza, amelynek lefuttatásával egy standard univerzális számítógép előállítja a bitsorozatot, majd megáll”.^[47]

Mindazonáltal Gell-Mann elmélete nem teljesen helytálló. Ha egy véletlenszerű információt tartalmazó állományunk van, akkor azt nem lehet tömöríteni. Ez a megállapítás valójában kulcskritérium annak a meghatározására, hogy egy számsorozat valóban véletlenszerű-e. Ugyanakkor, ha egy adott terv szerint valahol *tetszőleges* véletlenszerű számsorozat szerepelhet, akkor ez az információ is leírható egy egyszerű utasítással, például azzal, hogy „ez itt egy véletlenszerű számsorozat helye”. A véletlenszerű sorozat tehát – akár tíz bit, akár egymilliárd bit – nem képvisel szignifikáns nagyságú komplexitást, hiszen egyetlen egyszerű utasítással ábrázolható. Ez a különbség egy véletlenszerű számsorozat és egy megjósolhatatlan, céllal rendelkező információsorozat között.

A komplexitás természetének jobb megértéséhez vizsgáljuk meg egy kő komplexitását. Ha a kő összes atomjának összes jellemzőjét (pontos elhelyezkedés, szögsebesség, spin, sebesség stb.) meg kellene adnunk, óriási mennyiségű információt kapnánk. Egy 1 kilogrammos kőnek 10^{25} atomja van, melyek, ahogyan arra a következő fejezetben kitérek, akár 10^{27} bit információt is tartalmazhatnak. Ez százmilliószor milliárdszor több információ, mint az ember genetikai kódja (még a genetikai kód tömörítése nélkül is).^[48] Gyakorlati szempontból azonban ennek az információnak a nagy része véletlenszerű és nincs túl nagy jelentősége. A követ tehát gyakorlati célokra elég sokkal kevesebb információval, az alakjával és az anyagával jellemeznünk. Ennél fogva joggal tekinthetjük egy közönséges kő komplexitását sokkal kisebbnek, mint egy emberét, noha elméletileg a kő rengeteg információt tartalmaz.^[49]

Az egyik felfogás szerint a komplexitás az a minimális mennyiségű *jelentéssel bíró, nem véletlenszerű, azonban megjósolhatatlan* információ, amely egy rendszer vagy folyamat jellemzéséhez szükséges.

Gell-Mann felfogása szerint egy egymillió bites véletlenszerű karaktersorozat algoritmikus információtartalma körülbelül egymillió bit hosszú. Én tehát kiegészítem Gell-Mann AIC-fogalmát azzal a gondolattal, hogy minden egyes véletlenszerű karaktersorozatot az „ide véletlenszerű bitek kerülnek” egyszerű utasítással helyettesítünk.

Ám még ez sem elég. A következő problémát az esetleges adatok, mint egy telefonkönyvben található nevek és telefonszámok vagy a rendszeres időközönként mért sugárzás esetleg hőmérséklet jelentik. Ezek az adatok nem véletlenszerűek, az adattömörítő eljárások mégis csak kismértékben csökkentik a méretüket. Mégsem képviselnek olyan komplexitást, ahogyan a kifejezést általában értjük. Egyszerűen csak adatok. Szükségünk van tehát egy másik egyszerű utasításra, az „ide esetleges adatsorok kerülnek”-re is.

Az egy adott információhalmaz komplexitásának mérésére javasolt módszeremet összefoglalandó: először használjuk a Gell-Mann definíciója szerinti algoritmikus információtartalmat. Ezután minden véletlenszerű karaktersorozatot egy egyszerű utasítással helyettesítünk: „ide véletlenszerű bitek kerülnek”. Ezután ugyanezt tesszük az esetleges adatsorozatokkal. Így megkapjuk a komplexitás mértékének azt a változatát, ami egybevág az intuíciónkkal.

Helytálló megfigyelés, hogy az evolúciós folyamatok, például a biológia – és folyománya, a technológia – paradigmaváltásai egyre nagyobb komplexitást eredményeznek, ahogyan azt fentebb meghatároztam. Például a DNS evolúciója egyre összetettebb organizmusok létrejöttét tette lehetővé, melyek biológiai információs folyamatainak vezérlése a rugalmas adattárolást biztosító DNS-molekulákban volt kódolva. A kambriumi robbanás biztosított egy stabil készletet az állati testtervekből (a DNS-ben), így az evolúciós folyamat a komplexebb agyi fejlődésre tudott koncentrálni. A technológia, a számítógép feltalálása biztosított eszközt az emberi civilizációnak arra, hogy egyre komplexebb információhalmazokat tároljunk és kezeljünk. Az internet jelentette kiterjedt kapcsolatrendszer pedig még nagyobb komplexitást biztosít.

Azonban önmagában a „komplexitás növekedése” nem végső célja vagy végterméke ezeknek az evolúciós folyamatoknak. Az evolúció nem feltétlenül bonyolultabb, hanem *j o b b* válaszokat eredményez. Néha az egyszerű megoldás a jobb. Vizsgáljunk hát meg egy másik fogalmat, a *rendet*! A rend nem egyenlő a rendezetlenség ellentétével. Ha a rendezetlenség az események véletlenszerű sorozata, akkor a rendezetlenség ellentétének a „nem véletlenszerűségnek” kell lennie. Az információ olyan adatsorozat, ami jelentéssel bír egy folyamatban, mint a DNS-kód egy biológiai szervezetben, vagy mint a bitek egy számítógépprogramban. Másfelől a „zaj” egy véletlenszerű sorozat. A zaj eredendően megjósolhatatlan, ám nem hordoz információt. Ugyanakkor az információ megjósolhatatlan. Ha a múltbeli adatok alapján meg tudjuk jósolni a jövőbeli adatokat, akkor a jövőbeli adatok már nem információk. Így sem az információt, sem a zajt nem lehet tömöríteni (úgy, hogy utólag veszteség nélkül visszaállítható legyen az eredeti állapot). Egy megjósolhatóan változó mintázatot (például a 0101010...-át) tekinthetünk rendezettnek, de az első két biten kívül nem hordoz információt.

A rendezettség tehát nem jelent rendet, mivel a rend megköveteli az információt. *A rend egy célnak megfelelő információ. A rend mértéke annak a mértéke, hogy mennyire felel meg az információ a célnak.* Az életformák evolúciójában a cél a túlélés. Egy evolúciós algoritmusban (egy számítógépprogramban, amely az evolúciót szimulálja egy probléma megoldásához), amit mondjuk

egy sugárhajtású hajtómű megtervezésére alkalmaznak, a cél a hajtómű teljesítményének, hatékonyságának és egyéb paramétereinek az optimalizálása.^[50] A rend mérése nehezebb, mint a komplexitás mérése. Fentebb tárgyaltam a komplexitás mérésének néhány megközelítését. A rend esetében szükségünk lenne a „siker” minden szituációra alkalmazható mértékére. Amikor evolúciós algoritmusokat alkotunk, a programozónak definiálnia kell a siker mércéjét (ezt nevezik „hasznossági függvénynek”). A technológiai fejlődés evolúciós folyamatához például hozzárendelhetjük a gazdasági siker mértékét.

Pusztán az, hogy több információ áll a rendelkezésünkre, nem feltétlenül eredményez jobb megfelelést. A nagyobb rend – a célnak való jobb megfelelés – néha egyszerűsítés révén érhető el, nem pedig a komplexitás további növelése révén. Például egy új elmélet, amely egymással látszólag összeegyeztethetetlen elképzeléseket fog össze egy tágabb, koherensebb rendszerbe, csökkenti a komplexitást, mégis növeli az „adott célt szolgáló rendet”. (Ebben az esetben a cél a megfigyelt jelenségek pontos modellezése.) Tulajdonképpen az egyszerűbb elméletek kialakítása a tudomány egyik hajtóereje. (Ahogy Einstein mondta: „mindennek a lehető legegyszerűbbnek kell lennie, de egy fokkal sem egyszerűbbnek”.)

Szemléletes példa erre a felfogásra az emberszabásúak evolúciójának egyik kulcsfontosságú lépése: a hüvelykujj forgáspontjának az eltolódása, ami a környezet precízebb manipulációját tette lehetővé.^[51] Az emberszabásúak, például a csimpánzok tudnak markolni, de sem „szorítani” nem képesek, sem az íráshoz vagy a tárgyak formálásához szükséges finommotoros koordinációval nem rendelkeznek. A hüvelykujj forgáspontjának az eltolódása nem növelte jelentősen az állat komplexitását, mindazonáltal növelte a rendet, lehetővé téve, többek között, a technológia kifejlődését. Az evolúció ugyanakkor azt bizonyítja, hogy a nagyobb rend felé mutató általános trend általában nagyobb komplexitást eredményez.^[52]

Így tehát egy probléma megoldásának a megtalálása – ami általában növeli, de néha csökkenti a komplexitást – növeli a rendet. Most már csak a probléma definiálásának a kérdése maradt hátra. Az evolúciós algoritmus (és általában véve a biológiai és technológiai evolúció) kulcsa tulajdonképpen pontosan ez: a probléma definiálása (ami magában foglalja a hasznossági függvényt is). A biológiai evolúció általános problémája mindig is a túlélés volt. Egyes ökológiai fülkékben ez a mindent felülíró kihívás konkrétabb célkitűzésekben nyilvánul meg, például bizonyos fajok arra irányuló képességében, hogy szélsőséges körülmények között is fennmaradjanak vagy el tudjanak rejtőzni a ragadozók elől. Ahogy a biológiai evolúció az emberszabásúak felé haladt, maga a cél fejlesztette ki a képességet, hogy túljárjanak az ellenségek eszén, és ennek megfelelően manipulálják környezetüket.

Úgy tűnhet, mintha a gyorsuló megtérülések törvényének ez az aspektusa ellentmondana a termodinamika második törvényének, mely kimondja, hogy az entrópia (egy zárt rendszer rendezetlensége) nem csökkenhet, ezért előbb-utóbb általában növekszik.^[53] A gyorsuló megtérülések törvénye azonban az evolúcióra vonatkozik, ami nem zárt rendszerekben működik. Nagy káosz közepette zajlik, és tulajdonképpen a középpontjában lévő rendezetlenségtől függ, abból meríti a diverzitásra való lehetőségeit. Az evolúciós folyamat ezek közül a lehetőségek közül folyamatosan úgy választ, hogy nagyobb rendet hozzon létre. Még a krízisek, például a Földbe csapódó nagyobb aszteroidák is végső soron növelték – elmélyítették – a biológiai evolúció által teremtett rendet, noha ideiglenesen fokozták a káoszt.

Összefoglalva, az evolúció növeli a rendet, ami vagy növeli a komplexitást, vagy nem (de általában növeli). Az evolúció – az életformák vagy a technológia evolúciója – felgyorsulásának egyik alapvető oka az, hogy a saját növekvő rendjére építkeznek, és egyre kifinomultabb eszközökkel rendelkeznek az információ megőrzésére és manipulálására. Az evolúció által létrehozott újítások

gyorsabb evolúcióra sarkallnak és gyorsabb evolúciót tesznek lehetővé. Az életformák evolúciója esetében a legfigyelemreméltóbb korai példa a DNS, amely az élet tervrajzának megörökített és védett leírását biztosítja, amire alapozva újabb kísérleteket lehet elindítani. A technológia evolúciójának esetében az információ megörökítésének folyamatosan fejlődő emberi módszerei további előrelépéseket tettek lehetővé a technológia területén. Az első számítógépeket papíron tervezték meg és kézzel építették fel. Ma számítógépes munkaállomásokon tervezik őket, a következő nemzedék terveinek sok részletét maguk a számítógépek készítik el, majd teljesen automatizált gyárakban gyártják le őket, minimális emberi közreműködéssel.

A technológia evolúciós folyamata exponenciális módon növeli a kapacitásokat. A feltalálók célja a képességek megsokszorozása. Az innováció nem egyszerűen kumulatív, hanem önsokszorozó, azaz multiplikatív folyamat. A technológia, mint minden evolúciós folyamat, önmagából építkezik. Ez tovább fog gyorsulni, amikor az ötödik korszakban a technológia átveszi a teljes irányítást saját fejlődése fölött.^[54]

A gyorsuló megtérülések törvényének elveit a következőképpen foglalhatjuk össze:

- Az evolúció pozitív visszacsatolást alkalmaz: az evolúciós fejlődés egyik fázisából származó hatékonyabb módszerek felhasználásával létrejön a következő fázis. Ahogyan azt az előző fejezetben leírtuk, mindegyik evolúciós korszak egyre gyorsabban halad előre az előző fázis termékeire építkezve. Az evolúció indirekt módon működik: az evolúció létrehozta az embereket, az emberek létrehozták a technológiát, és az emberek most egyre fejlettebb technológiával igyekeznek létrehozni a technológia új nemzedékeit. A szingularitás idejére nem lesz különbség az emberek és a technológia között. *Nem azért, mert az emberek mai értelemben vett gépekké fognak válni, hanem mert a gépek az emberek szintjére és azon túl fognak fejlődni.* Átvitt értelemben a technológia lesz a szembefordítható hüvelykujj, amely lehetővé teszi a következő evolúciós lépésünk megtételét. A haladás (a rend további növekedése) ekkor olyan gondolkodási folyamatokon fog alapulni, amelyek fénysebességgel zajlanak, nem pedig az igen lassú elektrokémiai reakciók sebességével. Az evolúció minden fázisa az előző fázis gyümölcseire épít, és egy evolúciós folyamat fejlődési sebessége az idő múlásával legalább exponenciálisan növekszik. Idővel az evolúciós folyamatba ágyazott információ „rendje” (annak a mértéke, hogy az információ mennyire felel meg egy célnak, ami az evolúció esetében a túlélés) növekszik.
- Az evolúciós folyamat nem zárt rendszerekben működik, az evolúció egy nagyobb rendszer káoszából merít, onnan veszi a diverzitásra való lehetőségeit. Mivel az evolúció a saját egyre növekvő rendjére is épít, az evolúciós folyamatokban a rend exponenciálisan növekszik.
- A fenti megállapítás folyományaként az evolúciós folyamatok „megtérülései” (például a gyorsaság, a hatékonyság, a költséghatékonyság vagy egy folyamat általában vett „ereje”) az idő múlásával szintén legalább exponenciálisan növekednek. Ezt láthatjuk Moore törvényében, mely szerint a mikrochipek minden új nemzedéke (melyek jelenleg hozzávetőlegesen két évente bukkannak fel) ugyanakkora területen kétszer annyi alkatrészt tartalmaz, s ezek lényegesen gyorsabban működnek (mivel az elektronoknak kisebb távolságokat kell megtenniük az alkatrészek között és azokon belül, illetve további tényezők miatt). Ahogyan azt lentebb illusztrálni fogom, az információalapú technológiák teljesítményének és ár–teljesítmény-arányának ez az exponenciális javulása nem korlátozódik a számítógépekre, hanem lényegében minden információtechnológiára igaz, és

magában foglalja a sokféle módon mért emberi tudást is. Azt is fontos megjegyezni, hogy az „információtechnológia” kifejezés a jelenségek egyre szélesebb körét öleli fel, és végső soron tartalmazni fog minden gazdasági és kulturális tevékenységet.

- Egy másik pozitív visszacsatolás, hogy minél hatékonyabbá válik egy evolúciós folyamat – például minél nagyobb teljesítményt és költséghatékonyságot ér el a számítás –, annál több erőforrás fordítható a folyamat további fejlesztésére. Ennek eredményeképpen létrejön az exponenciális növekedés második szintje; azaz maga az exponenciális növekedés rátája sem állandó ütemű – az exponenciális függvényben szereplő kitevő maga is egy exponenciális kifejezés. Például ahogy később, a *Moore törvénye: az ötödik paradigma* című ábrán láthatjuk, a XX. század elején három év kellett a számítás ár-teljesítmény-arányának kétszeres javulásához, a század közepén viszont csak kettő. Jelenleg körülbelül évente feleződik meg. Nemcsak a chipek teljesítménye duplázódik meg évente, hanem a gyártott chipek száma is exponenciálisan nő, így a számítástechnikai kutatási ráfordítások drámaian megnöttek az évtizedek során.

- A biológiai evolúció is ilyen folyamat; mi több, ez a kvintesszenciális evolúciós folyamat. Mivel egy teljesen nyitott rendszerben zajlott (szemben az evolúciós algoritmusok mesterséges korlátaival), a rendszer sok szintje egyszerre alakult ki. Nemcsak az egy faj génjeiben tárolt információ haladt a nagyobb rend felé, de maga az evolúciós folyamatot megvalósító teljes rendszer is így fejlődik. Például a kromoszómák száma és a kromoszómák által hordozott génszekvenciák is fejlődtek az idő múlásával. Vagy például az evolúció kifejlesztett bizonyos módszereket arra, hogy megvédje a genetikai információt a súlyos sérülésektől (bár kismértékű mutáció engedélyezett, hiszen jótékony mechanizmus a folyamatos evolúciós fejlődés szempontjából). Ennek az egyik alapvető eszköze a genetikai információ megismétlése a páros kromoszómákon. Ez biztosítja, hogy ha sérül is valamelyik gén vagy kromoszóma, a párja nagy valószínűséggel ép és helyes marad. Még a pár nélküli Y férfi kromoszóma is kifejlesztett egy módszert az információtartalma biztonsági mentésére, magán az Y-kromoszómán megismételve azt.^[55] A genom mindössze körülbelül két százaléka kódol fehérjéket.^[56] A genetikai információ többi része bonyolult eszközöket fejlesztett ki annak a szabályozására, hogy a fehérjéket kódoló gének hogyan és mikor fejezzék ki magukat (hozzanak létre fehérjéket) egy folyamatban, melyet még éppen csak elkezdünk megérteni. Így az evolúció folyamata, például a mutáció megengedett mértéke, maga is fejlődött az idők során.

- A technológiai evolúció is egy evolúciós folyamat. A technológia új evolúciós folyamata az első, technológiát létrehozó fajok megjelenése nyomán indult el, azaz a technológiai evolúció tulajdonképpen a biológiai evolúció oldalhajtása és folytatása. A *Homo sapiens* néhány százezer év alatt fejlődött ki, és az emberszabásúak által teremtett technológia (például a kerék, a tűz és a köeszközök) első szakaszai alig valamivel fejlődtek gyorsabban, hiszen több tízezer év kellett a kialakulásukhoz és a széles körben való elterjedésükhöz. Félezer évvel ezelőtt egy paradigmaváltás termékének, a könyvnyomtatásnak a széles körű elterjedéséhez körülbelül egy évszázad kellett. Ma a nagyobb paradigmaváltások termékei, például a mobiltelefonok és a világháló alig néhány év alatt kerülnek széles körű felhasználásra.

- Egy adott paradigma (egy módszer vagy egy probléma megoldásának a megközelítése; például az integrált áramkörök tranzistorainak összezsugorítása, hogy nagyobb teljesítményű számítógépeket hozzunk létre) addig generál exponenciális növekedést, amíg

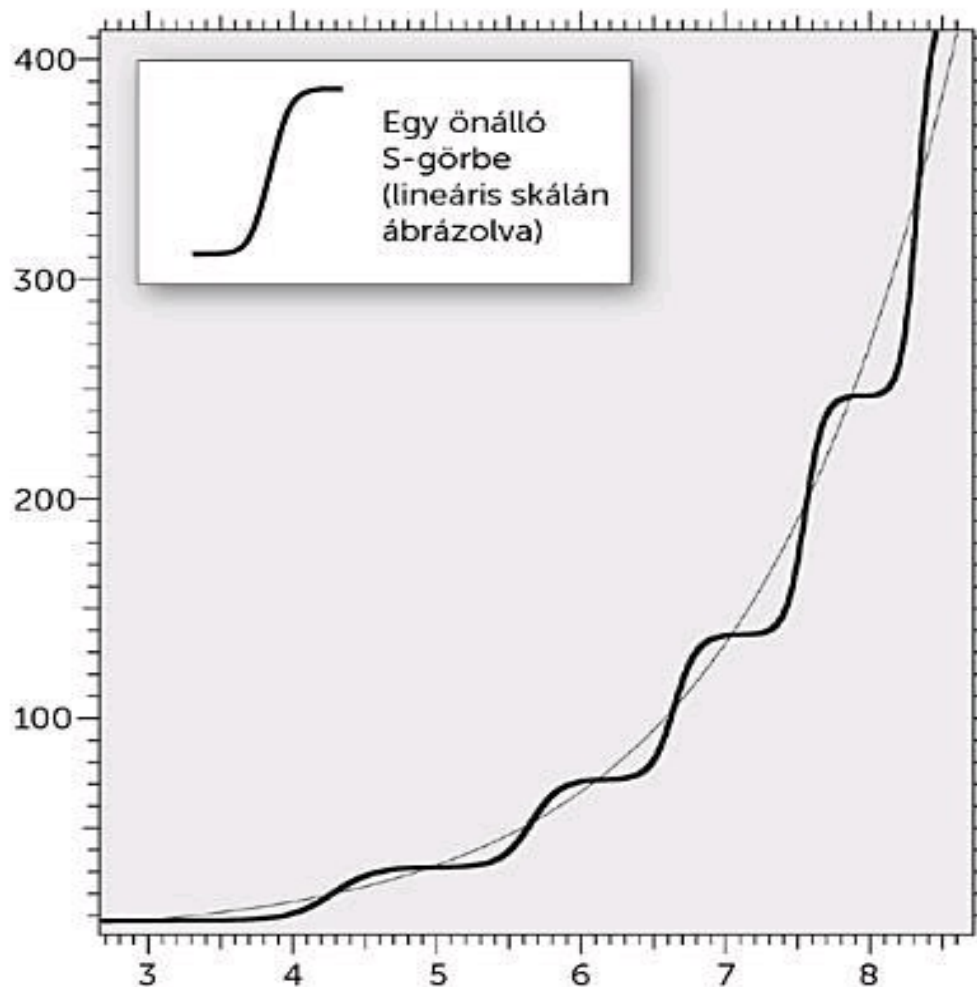
ki nem merül a potenciálja. Amikor ez megtörténik, paradigmaváltás következik be, ami lehetővé teszi az exponenciális növekedés folytatódását.

A paradigmák életciklusa. Minden paradigma három fejlődési szakaszon megy át:

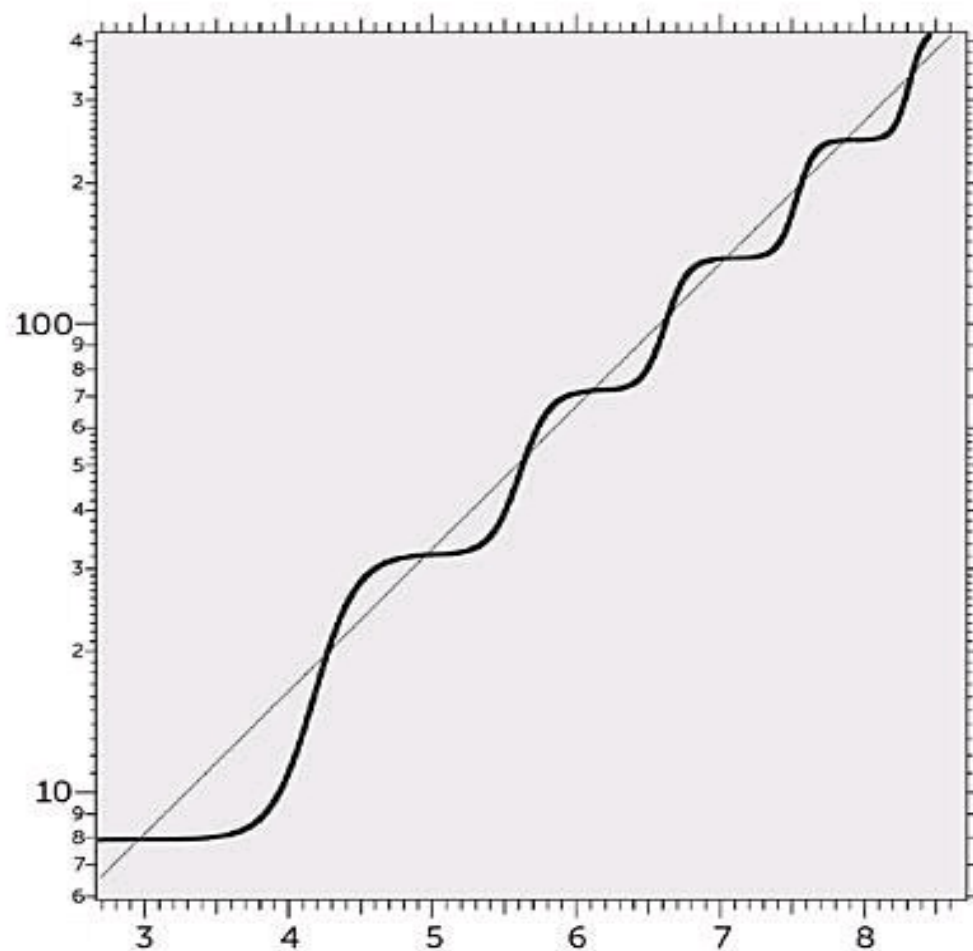
1. Lassú növekedés (az exponenciális növekedés kezdeti szakasza)
2. Gyors növekedés (az exponenciális növekedés későbbi, kirobbanó szakasza), ahogyan az S-görbe ábráján látható, lentebb
3. Az adott paradigma előregedésével együtt járó lassulás

Ennek a három szakasznak az előrehaladása egy kissé elnyújtott S-alakot mintáz. Az ábrán megfigyelhetjük, hogyan ábrázolható egy folyamatos exponenciális trend egy sor egymásra helyezett S-görbével. Az egymást követő S-görbék egyre gyorsabbak (kevesebb időt vesznek igénybe az időtengelyen, az x tengelyen) és egyre magasabbak (több helyet foglalnak el a teljesítménytengelyen, az y tengelyen).

Az S-görbék a biológiai növekedés jellemzői: egy versenyhelyzetben működő és a véges erőforrásokért küzdő viszonylag rögzített komplexitású rendszer (például egy adott fajba tartozó organizmusok) szaporodása. Gyakran ez történik például akkor, amikor egy faj rábukkan egy új, kellemes élőhelyre. Az egyedszáma exponenciális növekedésnek indul, majd megáll egy szinten. Az evolúciós folyamatok (legyenek bár molekulárisak, biológiaiak, kulturálisak vagy technológiaiak) teljes exponenciális növekedése meghaladja az adott paradigma (egy adott S-görbe) növekedési korlátait, mivel minden egyes paradigmában egyre nagyobb teljesítmény és hatékonyság fejlődik ki. Az evolúciós folyamatok exponenciális növekedése tehát több S-görbén is átível. Korunk legfontosabb példája a számítás lentebb tárgyalandó öt paradigmája. Az előző fejezetben, a paradigmaváltások felgyorsulását bemutató ábrákon látott teljes evolúciós fejlődés egymást követő S-görbékkel írható le. Mindegyik kulcsesemény, mint az írás vagy a nyomtatás, egy-egy új paradigmát és egy-egy új S-görbét jelent.



Folyamatos exponenciális sorozat, amelyet S-görbék alkotnak (lineáris skála)



Ugyanaz az S-görbékéből álló exponenciális sor logaritmikus skálán ábrázolva

A megszakított egyensúly (*punctuated equilibrium, PE*) vagy ugrásszerű evolúció elmélete szerint az evolúció során gyors változások, majd viszonylagos nyugalmi állapotok szakaszai követik egymást.^[57] A korszakos jelentőségű események ábráján feltüntetett kulcsesemények valóban megfigyelhetők a rend (és alapjában véve a komplexitás) exponenciális növekedése megújuló időszakainak, amelyeket egy-egy lassabb növekedésű szakasz követ, ahogy az egyes paradigmák az aszimptotájukhoz (képességeik korlátaikhoz) közeledtek. A PE tehát jobb evolúciós modellt kínál, mint azok a modellek, amelyek paradigmaváltásokon átívelő egyenletes fejlődést jósolnak.

Ám a megszakított egyensúly kulcseseményei, ha gyors változásokat eredményeznek is, nem azonnali ugrásokat képviselnek. Például a DNS kialakulása lehetővé tette az organizmusok felépítésének evolúciós fejlődésének fellendülését (de nem az azonnali ugrást), és ebből következően a komplexitás növekedését. A technológia közelmúltbeli történetében a számítógép feltalálása indított el egy másik, jelenleg is tartó fellendülést annak az információnak a komplexitásában, amit az emberi civilizáció képes kezelni. Ez az utóbbi fellendülés nem fogja elérni az aszimptotáját, amíg át nem itatjuk számítással a világegyetemet ránk eső régiójának anyagát és energiáját. Ennek a fizikai korlátait a 6. fejezetben, az *...a kozmosz intelligens sorsára* című részben fogjuk tárgyalni.^[58]

A paradigmák életciklusának ebben a harmadik, vagy öregedő fázisában elkezd felhalmozódni a következő paradigmaváltás felé ható nyomás. A technológia esetében pénzt fektetnek a kutatásba, hogy létrehozzák a következő paradigmát. Ezt láthatjuk napjainkban a háromdimenziós molekuláris számítógépek témájában végzett kiterjedt kutatásokban, annak ellenére, hogy még legalább egy évtizedig tartja magát a fotolitografikus eljárással a sík integrált áramkörökre zsugorított tranzistorok paradigmája is.

Általánosságban véve, mire egy paradigma az ár–teljesítmény–arány tekintetében megközelíti az aszimptotáját, a következő technikai paradigma bizonyos részterületeken már működik is. Például az 1950-es években a mérnökök az elektroncsövek lekicsinyítésén dolgoztak, hogy javítsák a számítógépek ár–teljesítmény–arányát, egészen addig, míg el nem érték a folyamat határait. Ekkor, 1960 körül a tranzistorok már erősen megvetették a lábukat a hordozható rádiók piacán, és később velük helyettesítették az elektroncsöveket a számítógépekben.

Az evolúciós folyamatok exponenciális növekedése mögött rejlő erőforrások bizonyos értelemben határtalanok. Az egyik ilyen erőforrás magának az evolúciós folyamatnak a (folyamatosan növekvő) rendje (hiszen, amint arra korábban rámutattam, az evolúciós folyamatok termékei tovább növelik a rendet). Az evolúció minden szakasza egyre jobb eszközöket biztosít a következő szakasz számára. Például a biológiai evolúcióban a DNS megjelenése erősebb és gyorsabb evolúciós „kísérletek” elvégzését tette lehetővé. Vagy hogy egy közelebbi példát hozzak, a számítógépes tervezőeszközök megjelenése lehetővé tette a számítógépek következő generációjának gyors kifejlesztését.

A rend folyamatos exponenciális növekedéséhez szükséges másik erőforrás annak a környezetnek a „káosza”, amelyben az evolúciós folyamat zajlik, és amely lehetőségeket biztosít a további diverzitásra.

A káosz biztosítja a változékonyságot, amely lehetővé teszi, hogy az evolúciós folyamatok erősebb és hatékonyabb megoldásokra bukkanjanak. A biológiai evolúcióban a diverzitás egyik forrása a génkombinációk keveredése és létrejötte a szexuális úton történő szaporodás révén. A szexuális úton történő szaporodás önmagában véve is evolúciós találmány, ami felgyorsította a biológiai alkalmazkodás folyamatát, és nagyobb teret engedett a génkeveredésnek, mint a nem szexuális úton történő szaporodás. A diverzitás egyéb forrásai közé tartoznak a mutációk és az örökre változó környezeti hatások. A technológiai evolúcióban az emberi leleményesség és a változó piaci

körülmények tartják fenn a fejlődést.

Fraktálmintázatok. A biológiai rendszerek információtartalmával kapcsolatban az a kulcskérdés, hogy a viszonylag kevés információt tartalmazó genom hogyan képes létrehozni olyan rendszereket, mint az ember, amely sokkal komplexebb, mint az őt leíró genetikai információ. Ezt például úgy lehet megérteni, ha a biológiai tervrajzokat „valószínűségi fraktáloknak” tekintjük. A determinisztikus fraktál olyan tervrajz, amelynek egy-egy elemét („kiinduló alakzatát”, iniciátorát) több elemmel helyettesítjük (amelyeket együttesen „generátornak” nevezünk). A fraktálképzés második iterációjában a generátor egyes alkotóelemei válnak kiinduló alakzattá és cserélődnek le ismét a generátor elemeire (pontosabban azok arányosan kisebb változataira). Ez a folyamat többször megismétlődik, a generátor minden újonnan létrejött eleme kiinduló alakzattá válik, és lecserélődik egy új, kisebb generátorra. A fraktálalakzatok mindegyik új nemzedéke láthatólag növeli a komplexitást, mégsem követel meg semmilyen új információt.

A valószínűségi fraktálokban megjelenik a bizonytalanság eleme is. Míg a determinisztikus fraktál mindig ugyanolyan, a valószínűségi fraktál minden előállításakor más lesz, bár általános jellemzői hasonlóak maradnak. A valószínűségi fraktáloknál annak a valószínűsége, hogy az adott iterációs lépésben minden generátorelem alkalmazásra kerül, kisebb mint egy. Az így létrejövő alakzatok jobban hasonlítanak az élő szervezetekre, mint a determinisztikus fraktálok. Valószínűségi fraktálokat használnak a grafikai programokban valóság-hű hegyek, felhők, tengerpartok, lomboszatok és egyéb természetes formák létrehozására. A valószínűségi fraktálok egyik kulcsfontosságú aspektusa az, hogy viszonylag kevés információból kiindulva lehetővé teszik látszólag nagy komplexitású és részletgazdag alakzatok létrehozását. A biológia ugyanezt az elvet alkalmazza. A gének biztosítják a terv információját, de az élőlények sokkal több részlettel rendelkeznek, mint a genetikai terv információtartalma.

Egyes kutatók tévesen értelmezik a biológiai rendszerek, például az agy részleteinek mennyiségét, többek között azzal érvelve, hogy minden egyes idegsejt minden egyes mikrostruktúrája (például a tubulusok) pontosan meg van tervezve és pontosan olyannak kell lennie, mint amilyen, ahhoz, hogy a rendszer működjön. Ám annak a megértéséhez, hogy hogyan működik egy olyan biológiai rendszer, mint az agy, meg kell értenünk a felépítése alapelveit, amik sokkal egyszerűbbek (azaz sokkal kevesebb információt tartalmaznak), mint azok a rendkívül részletes struktúrák, amelyeket a genetikai információ ezeknek az iteratív, fraktálszerű folyamatoknak a során létrehoz. Az egész emberi genomban mindössze nyolcszázmillió byte információ van, ez adattömörítés után csak körülbelül harminc-száz millió byte. Ez hozzávetőleg százmilliószor kevesebb információ, mint amennyit az összes idegsejtkapcsolat és ingerületátvivő anyag koncentrációmintázata jelent egy teljesen kifejlett emberi agyban.

Gondoljuk át, hogyan vonatkozik a gyorsuló megtérülések törvénye az első fejezetben tárgyalt korszakokra! Az aminosavak összeállása fehérjékké, illetve a nukleinsavak RNS-láncokká összeállása megteremtette a biológia alapvető paradigmáját. Az önmagukat másoló RNS-(később pedig DNS-)láncok (2. korszak) digitális módszert biztosítottak az evolúciós kísérletek eredményeinek megörökítésére. Később a racionális gondolkodást (3. korszak) a szembefordítható végtagnyúlvánnyal (a hüvelykujjal) kombináló faj evolúciója alapvető, a biológiaiból a technikaiba irányuló paradigmaváltást okozott (4. korszak). A következő alapvető paradigmaváltás a biológiai gondolkodásról a hibrid, a biológiai és nem biológiai gondolkodást egyesítő gondolkodásra való áttérés lesz (5. korszak), ami magában foglalja majd a biológiai agyak visszafejtéséből származó

„biológiai által ihletett” folyamatokat is.

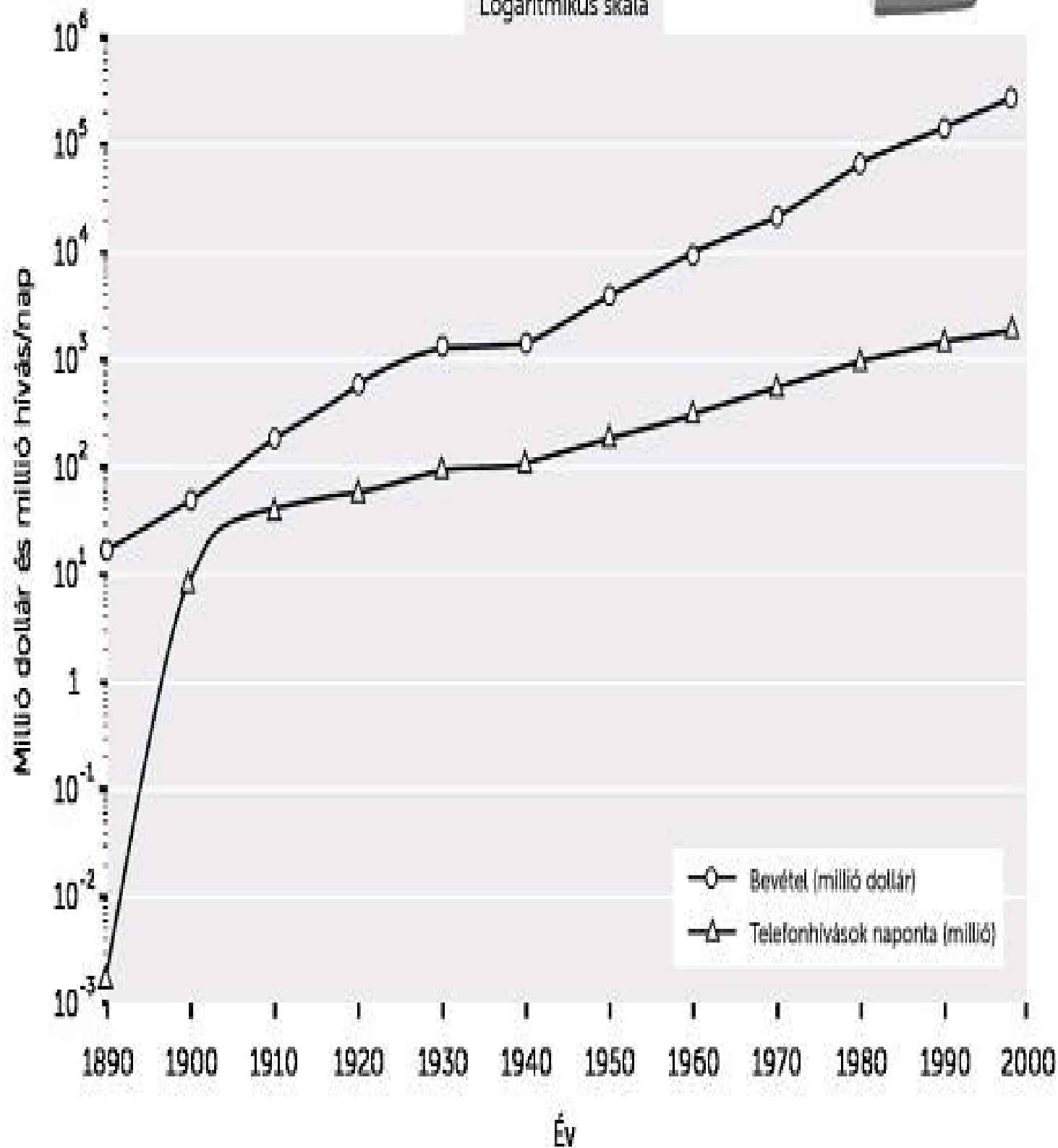
Ha megvizsgáljuk ezeknek a korszakoknak az időtényezőit, látni fogjuk, hogy mind egy folyamatosan gyorsuló folyamat részei. Az életformák evolúciójának első lépéseihez (primitív sejtek, DNS) évmilliárdokra volt szükség, aztán felgyorsult a fejlődés. A kambriumi robbanás során a fontosabb paradigmaváltások között csak évtízmilliók teltek el. Később az emberszabásúak mindössze néhány millió év alatt fejlődtek ki, a *Homo sapiens* pedig mindössze néhány százezer év alatt. A technológiát létrehozó faj eljövételével az exponenciális növekedés túl gyorsá vált a DNS-vezérelte fehérjeszintézis révén zajló evolúció számára, és az evolúció továbblépett az emberalkotta technológiára. Ez nem azt jelenti, hogy a biológiai (genetikai) evolúció nem folytatódik, csak azt, hogy már nem jár élen a rend (vagy a számítás hatékonysága és hatásossága) kialakítása szempontjából.^[59]

Az előrelátó evolúció. A biológiai evolúcióból és annak a technológiában való továbbéléséből származó, egyre növekvő rendnek és komplexitásnak számos elágazása van. Gondoljunk csak a megfigyelés korlátaira! A korai biológiai élet kémiai gradiensek révén a néhány milliméter távolságban zajló helyi eseményeket tudta érzékelni. Amikor kialakultak a látással rendelkező állatok, azok már több mérföldre lévő eseményeket is képesek voltak tanulmányozni. A távcső feltalálásával az ember több millió fényévre lévő galaxisokat is meg tud figyelni. Hasonlóképpen, mikroszkóp segítségével akár sejtméretű struktúrákat is meg tudunk vizsgálni. A mai ember a jelen technológiájával felfegyverkezve ellát a megfigyelhető világegyetem széléig, több mint tizenhárom milliárd fényévre, és látja a kvantumléptékű szubatomi részecskéket is.

Az amerikai telefonipar növekedése

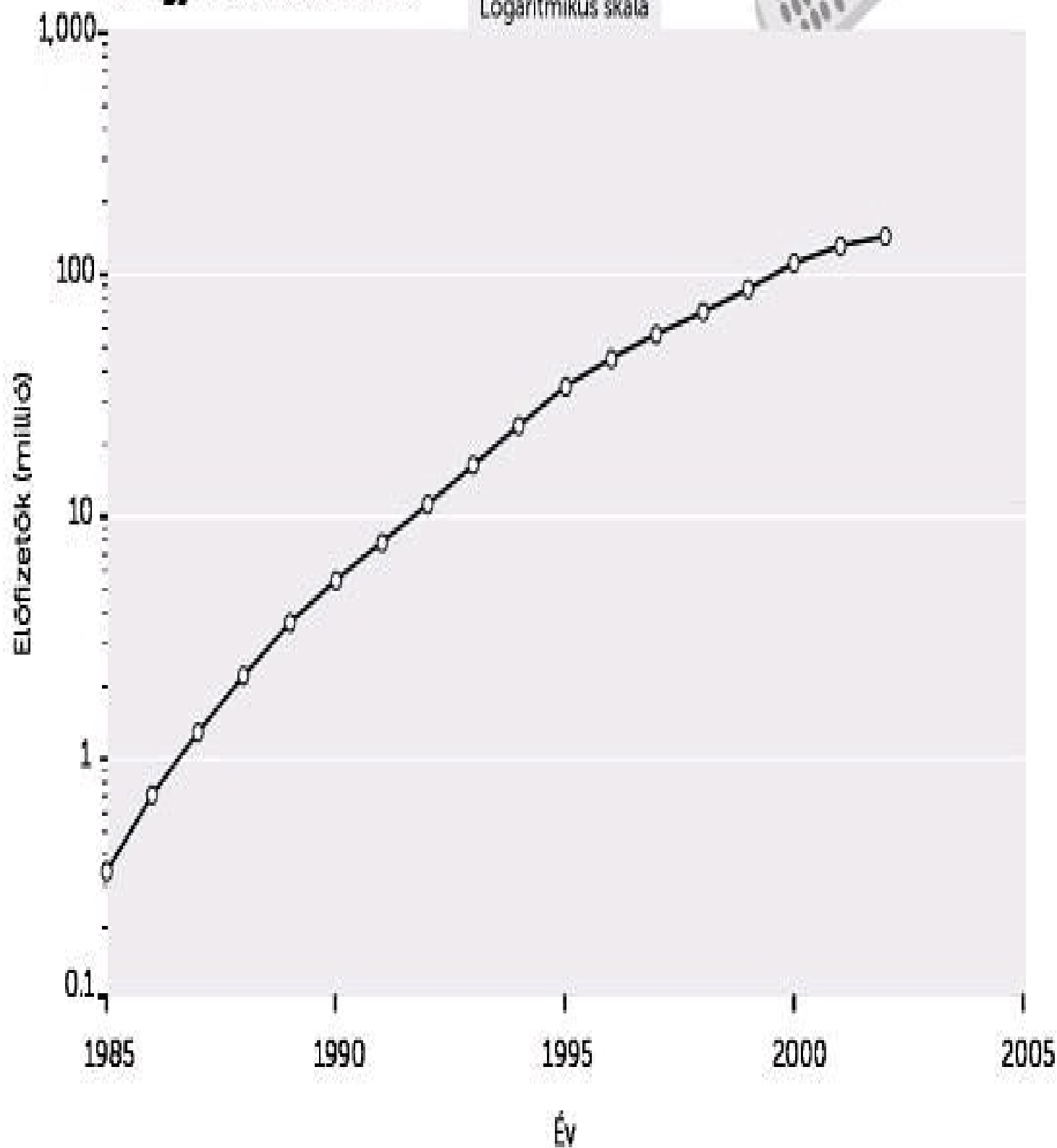


Logaritmikus skála



A mobiltelefon-előfizetők becsült száma az Egyesült Államokban

Logaritmikus skála



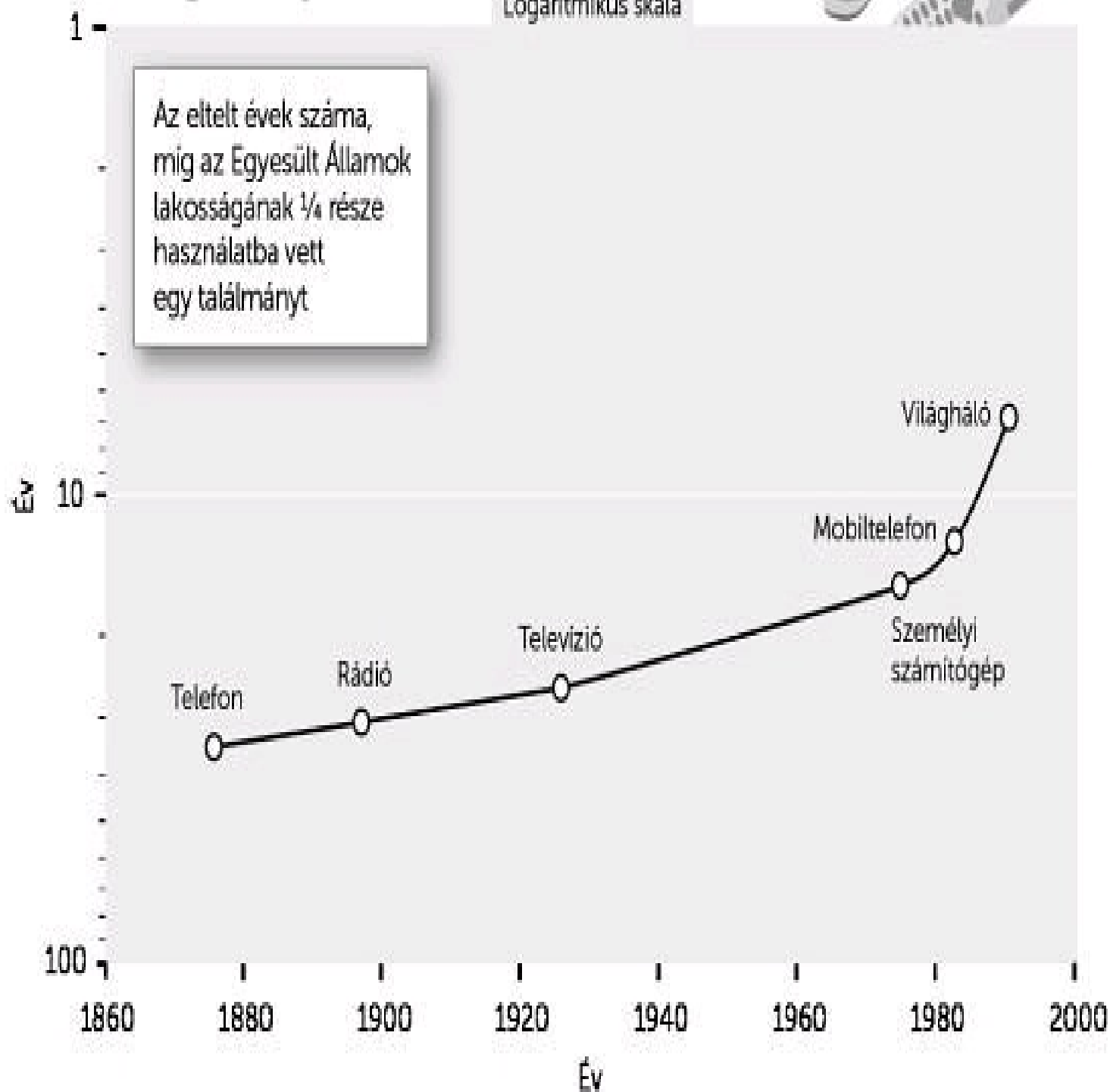
Vagy gondoljunk a megfigyelés időtartamára! Az egysejtű állatok kémiai reakciók révén néhány másodpercen át képesek emlékezni az eseményekre. Az aggyal rendelkező állatok napokig. A kultúrával rendelkező főemlősök nemzedékeken át képesek továbbörökíteni az információt. A szóbeli történelemmel rendelkező korai emberi civilizációk évszázadokon át meg tudták őrizni a történeteiket. Az írás megjelenésével az információ maradandósága több ezer év lett.

A technológiai paradigmaváltás felgyorsulásának egyik példjaként körülbelül fél évszázadig tartott, hogy a XIX. század végén feltalált telefon szignifikáns használati szintet érjen el (lásd az ábrát).^[60]

Ezzel szemben a XX. század végén mindössze egy évtized kellett a mobiltelefon széles körű elterjedéséhez.^[61]

A találmányok tömeges elterjedése

Logaritmikus skála



Összességében az elmúlt évszázad során egyenletes gyorsulás látható a kommunikációtechnológia széles körű elterjedésében.^[62]

Ahogy az az előző fejezetben tárgyaltuk, az új paradigmák elterjedésének sebessége, párhuzamosan a technológiai fejlődés sebességével, jelenleg minden évtizedben megduplázódik. Azaz minden évtizedben fele annyi ideig tart az új paradigmák átvétele, mint az azt megelőzőben. Ezzel a sebességgel a XXI. század technológiai fejlődése a 2000. évi fejlődési sebességgel számolva kétszáz évnnyi fejlődésnek fog megfelelni (lineárisan ábrázolva).^[63]^[64]

A technológia életciklusának S-görbéje

„Egy gép olyan jellegzetesen, zseniálisan és kifejezően emberi, mint egy hegedűszonáta vagy egy euklidészi tétel.”

(Gregory Vlastos)

„A cellájában némán dolgozó kódexmásoló szerzetest egy világ választja el a modern írógép csattogásától, ami egy negyed század alatt forradalmasította és megújította az üzleti életet.”

(Scientific American, 1905)

„Egyetlen korábbi kommunikációs technológia sem tűnt el, mindössze fokozatosan elvesztette a fontosságát, ahogy szélesedett a technológia horizontja.”

(Arthur C. Clarke)

Az íróasztalomon mindig van egy halom könyv, amelyekbe bele-belelapozok, amikor kifogyok az ötletekből, nyughatatlanság lesz úrrá rajtam, vagy más miatt támad szükségem ihletre. A kezembe vettem egy nemrég vásárolt vaskos kötetet, és megvizsgáltam a könyvkötő munkáját: 470 szépen nyomott oldal 16 lapos ívekből összerakva, melyek mindegyikét fehér cérnával varrták össze és ráragasztották a szürke vászongerincre. Az arany betűkkel nyomott keménytáblás borítók ízlésesen domborított kötéstáblával kapcsolódnak a könyvtesthez. Ezt a technológiát már évtizedekkel ezelőtt tökélyre fejlesztették. A könyvek olyan szerves részét képezik társadalmunknak – egyszerre tükrözve és formálva a kultúrát –, hogy nehéz nélkülük elképzelni az életet. Ám a nyomtatott könyvek sem élnek örökké, ahogy semmilyen más technológia sem.

A technológia életciklusa

Egy technológia életciklusában hét jól elkülöníthető szakaszt ismerhetünk fel.

1. Az „előfutár” szakaszban léteznek a technológia előfeltételei, és egyesek arról ábrándoznak, hogy valahogyan egységbe foglalják ezeket az elemeket. Az ábrándozás azonban nem egyenlő a feltalálással, még ha valaki le is írja az álmait. Leonardo da Vinci meggyőző képeket rajzolt repülőgépekről és autókról, mégsem gondoljuk, hogy ő találta volna fel bármelyiket is.

2. A következő szakasz, amit nagyon nagyra tart a kultúránk, a feltalálás. Igen rövid szakasz, bizonyos szempontból hasonló a hosszas vajúrást követő szülés folyamatához. A feltaláló a kíváncsiságát, a tudományos ismereteit, az elszántságát és általában némi színpadiasságot latba vetve új módon egyesíti a régi módszereket, és világra hoz egy új technológiát.

3. Ezután következik a fejlesztés szakasza, melyben a találmányt rajongói (köztük esetleg magával a feltalálóval is) védik és támogatják. Ez a szakasz gyakran fontosabb, mint maga a feltalálás aktusa, és történhetnek benne olyan felfedezések, melyek még magánál a találmánynál is jelentősebbeknek bizonyulnak. Sok barkácsoló épített szép, kézzel készített, ló nélküli kocsikat, mégis Henry Ford találmánya, a tömeggyártás tette lehetővé, hogy az autó gyökeret verjen és virágzásnak induljon.

4. A negyedik szakasz a beérésé. Noha a technológia tovább fejlődik, most már saját életet él és a társadalom szerves részévé válik. Előfordulhat, hogy annyira beágyazódott a mindennapi élet szövetébe, hogy a megfigyelők azt hiszik, örökké létezni fog. Ez érdekes drámát teremt a következő szakasz eljövetelekor, amelyet a hamis trónkövetelők szakaszának nevezek.

5. Itt egy új kezdeményezés kezdi háttérbe szorítani a régebbi technológiát. A rajongói idő előtt megjósolják a győzelmét. Noha vannak előnyei, jobban szemügyre véve az új technológiából hiányoznak a funkcionalitás vagy a minőség bizonyos kulcsfontosságú elemei. Amikor egyértelművé válik, hogy nem fogja megdönteni a fennálló rendet, a konzervatívok ezt bizonyítéknak tekintik arra, hogy az eredeti megközelítés valóban örökké fog létezni.

6. Ez általában rövid életű győzelem az öregedő technológia számára. Általában nem sokkal ezután

egy másik új technológiának sikerül elavulttá tennie az eredetit. A régi technológia életciklusának ebben a szakaszában fokozatos hanyatlásnak indul, eredeti célját és funkcionalitását átveszi egy frissebb vetélytársa.

7. A régi technológia teljes életciklusának 5-7 százalékát kitevő utolsó szakaszban végleg régiséggé válik (ahogyan a lovaskocsi, a csembaló, a bakelit hanglemez és a mechanikus írógép). A XIX. század közepén több előfutára is volt a fonográfnek, köztük Léon Scott de Martinville fonautográfja, amely a hangrezgéseket rajz formájában rögzítette. Azonban Thomas Edison volt az, aki a meglévő elemeket egybefogta és 1877-ben feltalálta az első berendezést, amely rögzíteni és lejátszani is tudta a hangot. Ezután további finomításokra volt még szükség, hogy a fonográf kereskedelmi forgalomba kerülhessen. 1949-ben vált teljesen elavult technológiává, amikor a Columbia bemutatta a 33-as fordulatszámú bakelitlemezt, majd az RCA Victor a 45-ös fordulatszámút. A hamis trónkövetelő a magnókazetta volt, amelyet az 1960-as években mutattak be és az 1970-es években népszerűsítettek. Korai rajongói azt jósolták, hogy kis mérete és többszöri felhasználhatósága elavulttá teszi a viszonylag nagy és sérülékeny bakelitlemezeket.

Nyilvánvaló előnyei ellenére a magnókazettán nehézkes a felvett anyag keresése, a maga jellegzetes módján torzít, és nem hűen adja vissza a hangot. A halálos csapást a kompakt diszk, a CD vitte be a bakelitlemeznek. A CD közvetlen hozzáférést biztosít a tartalmához, a minősége pedig megközelíti azt, amit az emberi hallórendszer egyáltalán érzékelni képes. Ekkor merült végképp feledésbe a fonográf felvétel. Noha még ma is gyártják, a technológia, amelyet Edison közel 130 évvel ezelőtt feltalált, régiséggé vált.

Vagy gondoljunk a zongorára, egy olyan technológiai területre, amelyben személyesen is érintett vagyok! A XVIII. század elején Bartolomeo Cristofori azt szerette volna elérni, hogy az akkori csembalókon attól függően más hang szólaljon meg, hogy az előadó milyen erővel nyomja le a billentyűket. Találmánya, a *gravicembalo col piano e forte* („hangos és halk csembaló”) nem aratott azonnal sikert. További finomítások, például Stein bécsi és Zumpe angol mechanikája segített abban, hogy a zongora meghatározó billentyűs hangszerré váljon. Teljesen kiforrott formáját Alpheus Babcock 1825-ben szabadalmaztatott találmányával, a vasból készült, egy darabból álló kerettel érte el, és azóta csak apróbb módosításokat végeztek rajta. A hamis trónkövetelő az elektromos zongora volt az 1980-as évek elején, amely jóval tágabb körű funkcionalitást kínált. Az akusztikus zongora egyféle hangjával szemben az elektromos változat tucatnyi hangszer hangját kínálta, a szekvencerek és az automatizált kíséret révén pedig a zenész akár egy teljes zenekar hangzását előállíthatta. Emellett oktatóprogramok segítségével lehetett gyakorolni rajta a játékot, és még sok egyéb funkciója volt. Mindössze a jó minőségű zongorahangzás hiányzott belőle.

Ez a kritikus hiányosság és az elektromos zongorák első nemzedékének ebből következő bukása ahhoz a széles körben elterjedt nézethez vezetett, hogy a zongorát soha nem fogja leváltani az elektronika. Ám az akusztikus zongora „győzelme” nem lesz örök.

A digitális zongorák sokkal szélesebb körű funkcióikkal és kedvezőbb ár-teljesítmény-arányukkal már most sokkal több háztartásban vannak jelen, mint az akusztikusak. Sokan úgy vélik, hogy a digitális zongorák hangja ma már legalábbis eléri, ha meg nem haladja az akusztikus zongorák hangjának minőségét. A koncert- és luxus zongorák kivételével (amelyek a piac igen kis részét adják) az akusztikus zongorák eladásai folyamatosan csökkennek.

A kecskebőrtől a letöltésig

Tehát a technológiai életciklus melyik szakaszában van a könyv? Az előfutárai a mezopotámiai agyagtáblák és az egyiptomi papirusztekercsek voltak. Az i. e. II. században az egyiptomi Ptolemaioszok hatalmas könyvtárat hoztak létre Alexandriában tekercsekből, és betiltották a papirusz kivitelét az országból, hogy csökkentsék a versenyt.

Az első könyveket valószínűleg II. Eumenész, az ókori görög Pergamon uralkodója készítette, kecskék és juhok bőréből készült pergamenlapok felhasználásával, melyeket összevarrtak és fából készült fedéllel láttak el. Eumenész ezzel a technikával létre tudott hozni egy az alexandriaival vetekedő könyvtárat. Körülbelül ugyanebben az időben a kínaiak is kialakítottak egy durva, bambuszcsíkokból készített könyvfajtát.

A könyvek fejlődése és beérése három nagy találmány révén történt. A fadúcos nyomtatás, amivel legelőször a kínaiak kísérleteztek az i. sz. VIII. században, lehetővé tette, hogy a könyveket nagy mennyiségben sokszorosítsák, s ezzel a világi és vallási vezetőkön kívül a nagyközönség számára is hozzáférhetővé tegyék. Még nagyobb jelentőségű volt a mozgatható nyomóelem megjelenése, amivel a kínaiak és a koreaiak már a XI. században kísérleteztek, de az ázsiai írásjelek bonyolultsága miatt nem jártak sikerrel. Johannes Gutenberg a XV. században (1455-ben) a római betűkészlet viszonylagos egyszerűségét kihasználva kinyomtatta a Bibliát, az első nagyobb lélegzetvételű művet, amelyet teljes mértékben mozgatható nyomóelemekkel nyomtattak.

Noha a nyomtatás mechanikus és elektromechanikus folyamatát folyamatosan fejlesztették, a könyvkészítés technológiájának következő minőségi ugrása a számítógépes szedéssel érkezett el,

ami két évtizeddel ezelőtt elavulttá tette a mozgatható nyomóelemeket.

A tipográfiát ma már a digitális képfeldolgozás részének tekintik.

Ahogy a könyvkészítés teljesen érett technológiává vált, körülbelül húsz évvel ezelőtt megjelentek a hamis trónkövetelők az „elektronikus könyvek” első hullámának formájában. Miképpen az általában lenni szokott, ezek a hamis trónkövetelők drámai minőségi és mennyiségi előnyöket kínáltak. A CD-ROM-on vagy flashmemóriában tárolt elektronikus könyvek több ezer könyvnek megfelelő információmennyiséget hordoznak, számítógéppel kereshető formában. Az interneten, CD-ROM-on vagy DVD-n lévő enciklopédiákban gyorsan rá tudunk keresni egy-egy kifejezésre, számos logikai feltételt adhatunk meg a keresésnél, ami egyszerűen lehetetlen például az én polcomon sorakozó harminchárom kötetes enciklopédiának az esetében. Az elektronikus könyvekben lehetnek animált képek, és a szövegek az általunk adott input szerint is változhatnak. Az oldalak nem feltétlenül sorban követik egymást, hanem intuitívabb kapcsolatok mentén is bejárhatók.

Ahogy a fonográf és a zongora esetében is történt, a hamis trónkövetelők első nemzedékéből hiányzott (és még ma is hiányzik) az eredeti technológia egyik lényegi jellemzője, ami jelen esetben a papír és a tinta kiváló vizuális minősége. A papír nem remeg, az átlagos katódsugárcsőves számítógép-monitorok ezzel szemben másodpercenként ötvenszer-hatvanszor frissítik a képüket. Ez a főmlősök vizuális rendszerének egyik evolúciós adaptációja miatt jelent problémát, nevezetesen amiatt, hogy a látóterünknek csak egy kis részét látjuk nagy felbontásban. Ez a rész, amely a retina látógödörében képeződik le, ötven-ötvenöt centiméteres távolságot feltételezve egy körülbelül egy szó nagyságának megfelelő területre fókuszál. A látógödörön kívüli terület nagyon alacsony felbontású képet érzékel, ám rendkívül érzékeny a fényerősség változásaira. Ez a képesség tette lehetővé elődeink számára, hogy hamar észrevegyék a támadásra készülő ragadozókat. A VGA monitorok folyamatos vibrálását mozgásként érzékeli a szemünk, és ez folyamatos mozgást idéz elő a látógödörben. Ez jelentősen lelassítja az olvasási sebességet, és többek között ezért rosszabb a képernyőn lévő szöveget olvasni, mint egy nyomtatott könyvet. Ezt a problémát a nem vibráló TFT kijelzők oldották meg.

A másik kritikus probléma a kontraszt – egy jó minőségű könyv tinta-papír kontrasztja körülbelül 120:1; az átlagos képernyőké feleannyi –, illetve a felbontás. A könyvekben a szöveg és az illusztrációk körülbelül 600–1000 pont per hüvelyk (dpi) felbontásúak, a számítógép-képernyők felbontása nagyjából tizedennyi.

A számítógépes eszközök mérete és súlya kezdi közelíteni a könyvékéét, de még mindig nehezebbek, mint egy puhakötésű könyv. És a papírkönyvek akkumulátora soha nem merül le.

Ami a legfontosabb: ott van még az elérhető szoftverek problémája, ami alatt a forgalomban lévő hatalmas mennyiségű nyomtatott könyvet értem. Az Egyesült Államokban évente ötvenezer új könyvet adnak ki, és több millió van kereskedelmi forgalomban. Komoly erőfeszítések történnek jelenleg is a nyomtatott anyagok beszkennelésére és digitalizálására, de sok időnek kell még eltelnie addig, hogy az elektronikus adatbázisok hasonló mennyiségű anyagot tartalmazzanak. Itt a legnagyobb akadály a kiadók teljesen érthető vonakodása a könyvek elektronikus változatának megjelentetésétől, tekintettel arra, milyen pusztító hatással volt az illegális fájlmegosztás a zeneiparra.

Ezekre a korlátokra folyamatosan születnek a megoldások. Az új, olcsó megjelenítő eszközök kontrasztja, felbontása, képélessége és betekintési szöge kezd közelíteni a jó minőségű papír dokumentumokéhoz. Fejlesztés alatt állnak a hordozható eszközök számára tervezett energiacellák, amelyek több száz óra üzemidőt tesznek lehetővé. A hordozható elektronikus eszközök mérete és súlya már összevethető a könyvékével. A legfőbb problémát az elektronikus információ biztonságos terjesztése fogja jelenteni. Ez alapvető érdeke a gazdaságunk minden szintjének. Hamarosan minden információ lesz – még a fizikai termékek is, amint körülbelül húsz év múlva valósággá válik a nanotechnológia alapú gyártás.

Moore törvénye, és ami azon túl van

„Az ENIAC kalkulátora 18 000 elektroncsőből áll és 30 tonnát nyom. A jövő számítógépei mindössze 1000 elektroncsőből fognak állni, és talán 1,5 tonnát fognak nyomni.”

(Popular Mechanics, 1949)

„A számítógép-tudomány annyira szól a számítógépekről, mint a csillagászat a távcsövekről.”

(E. W. Dijkstra)

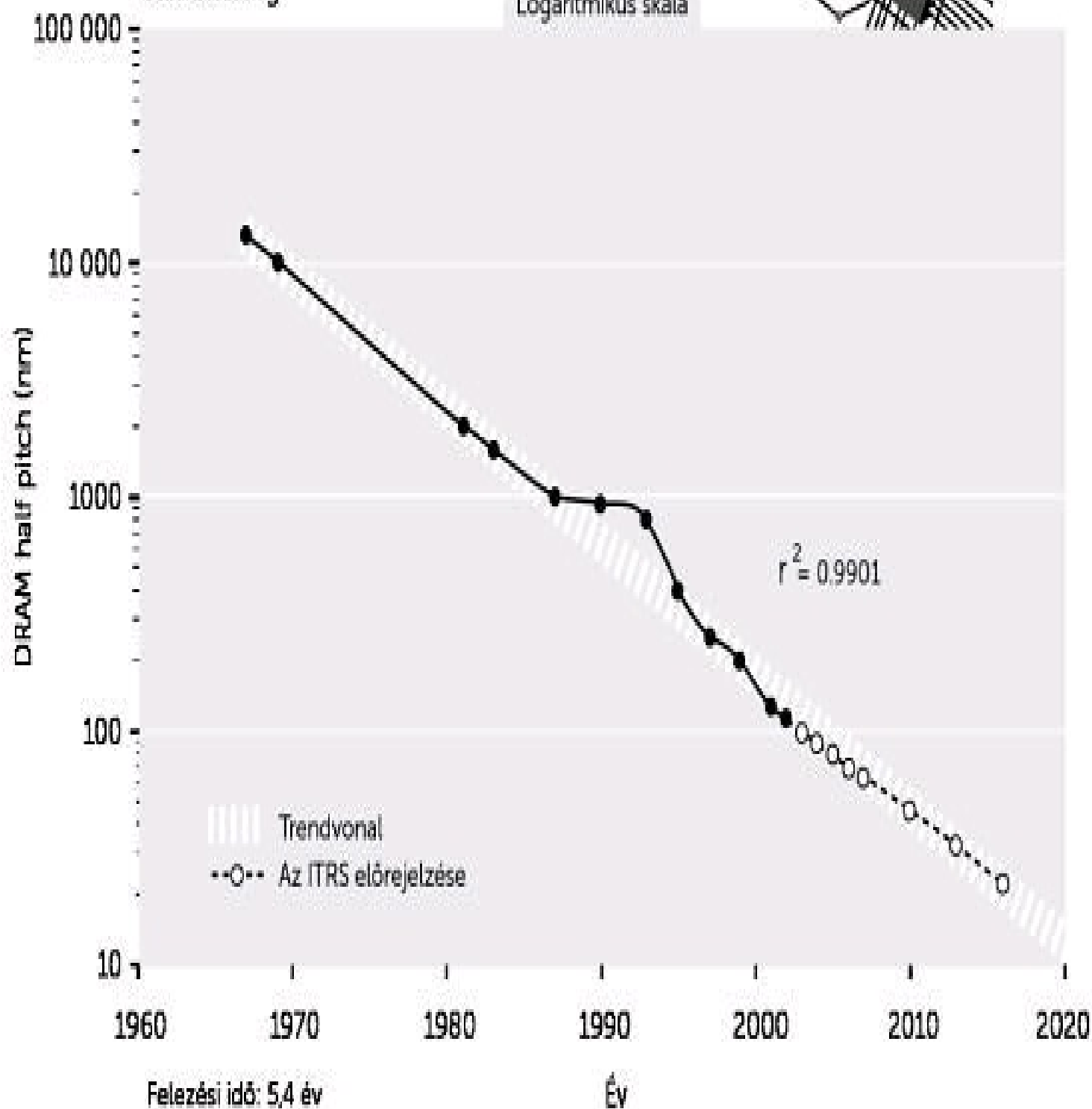
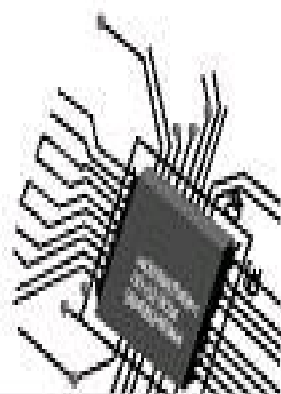
Mielőtt elgondolkodnánk a szingularitás további következményein, vizsgáljuk meg a technológiák azon széles körét, melyekre a gyorsuló megtérülések törvénye vonatkozik! A nagyközönség által legismertebb exponenciális trend Moore törvénye néven vált ismertté. Gordon Moore, integráltáramkör-tervező és később az Intel igazgatóságának a tagja, az 1970-es évek közepén megállapította, hogy az egy integrált áramkörre rázsúfolható tranzisztorok száma huszonnégy hónaponként megduplázódik (az 1960-as évek közepén még tizenkét hónap volt a becslése). Tekintettel arra, hogy így az elektronoknak kisebb távolságot kell megtenniük, az áramkörök gyorsabbak is lesznek, tovább növelve a teljes számítási kapacitást. Ennek következménye a számítás ár–teljesítmény-arányának exponenciális javulása. Ez a huszonnégy havonkénti megkettőződés sokkal gyorsabb, mint a korábban említett paradigmaváltás duplázódási sebessége, ami körülbelül tíz év. Általánosságban azt láthatjuk, hogy az információtechnológiai teljesítmény különböző mérőszámainak – ár–teljesítmény, sávszélesség, kapacitás – duplázódási ideje körülbelül egy év.

Moore törvényének alapvető hajtóereje a félvezetők méretének csökkenése, mely méret 5,4 évenként minden térbeli irányban a felére zsugorodik. (Lásd az ábrát lentebb.) Mivel a chippek gyakorlatilag kétdimenziósak, az egy négyzetmilliméterre eső alkatrészek száma 2,7 évenként duplázódik meg. [\[65\]](#)

Dinamikus RAM

A legkisebb („half pitch”) csikszélesség

Logaritmikus skála



A következő ábrákon a történelmi adatokkal együtt ábrázoljuk a félvezetőipar 2018-ig előremutató terveit (a Sematech „Nemzetközi technológiai előrejelzés a félvezetőkre” [*International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS*] alapján).

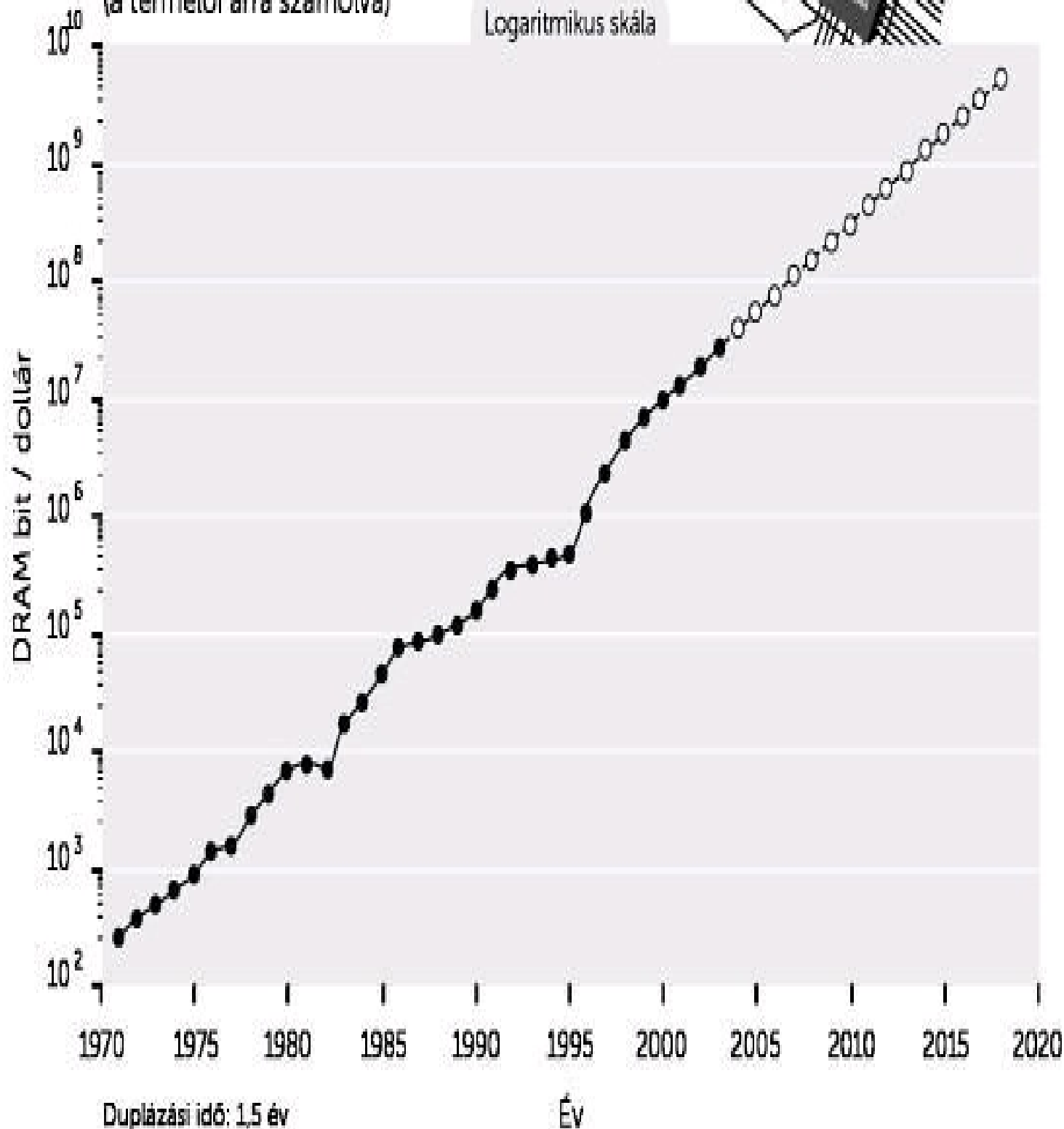
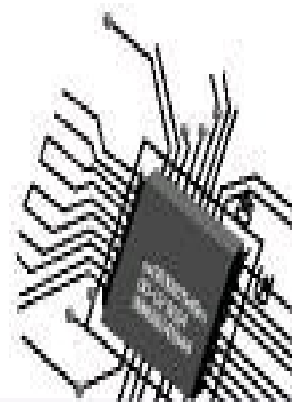
A DRAM (*dynamic random access memory*, dinamikus véletlen hozzáférésű memória) egy négyzetmilliméterre vetített előállítási költsége is folyamatosan csökken. Az egy dollárba kerülő DRAM bitek számának duplázási ideje mindössze 1,5 év. [\[66\]](#)

Hasonló trend figyelhető meg a tranzisztorok esetében is. 1968-ban egy dollárért egy tranzisztort lehetett venni; 2002-ben körülbelül tízmilliót. Mivel a DRAM speciális terület, amelynek megvannak a maga újításai, az átlagos tranzisztorár felezési ideje valamivel nagyobb, mint a DRAM-é, körülbelül 1,6 év (lásd az ábrát). [\[67\]](#)

Dinamikus-RAM-ár

Bit per dollár termelői ár
(a termelői árra számolva)

Logaritmikus skála



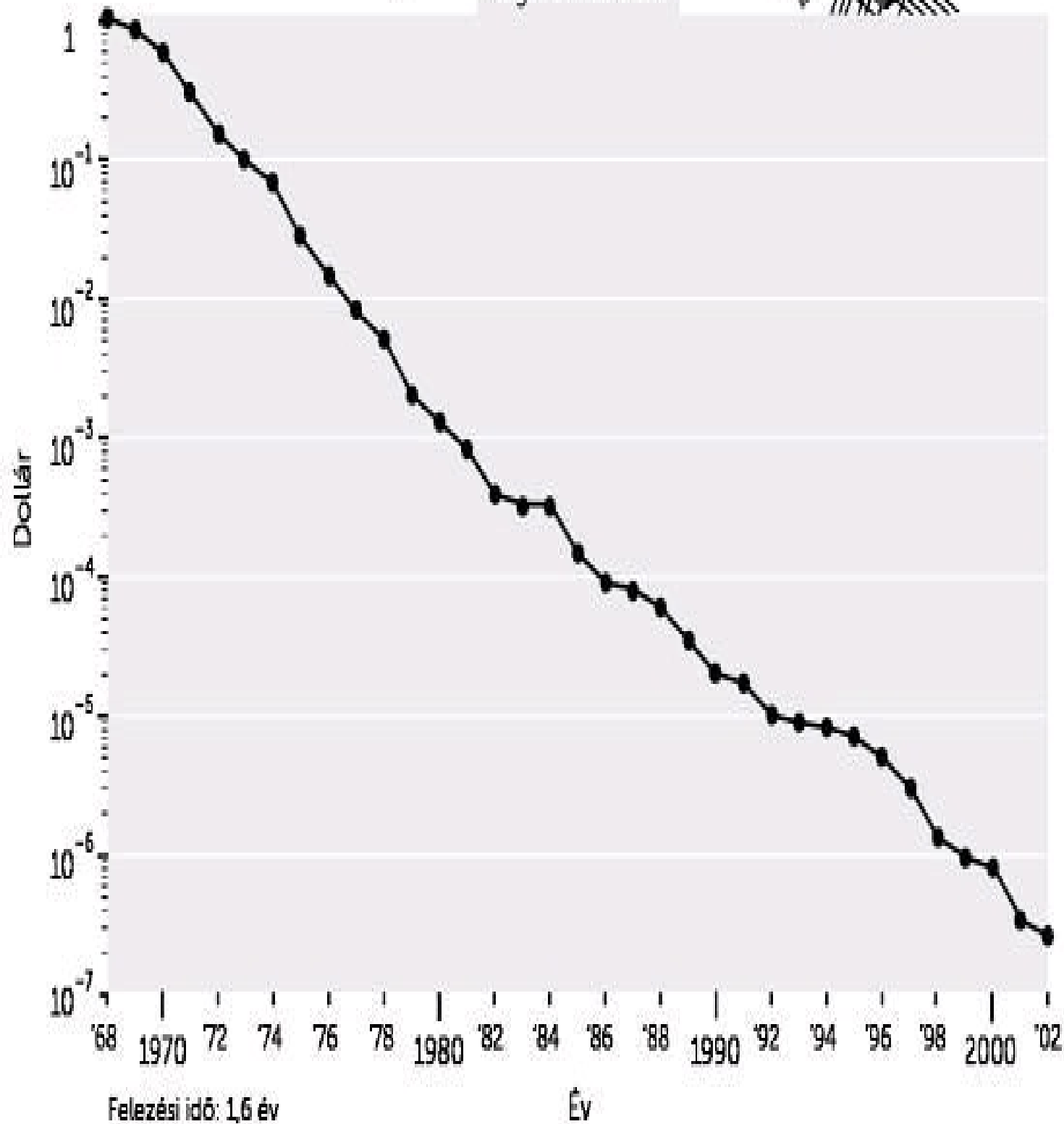
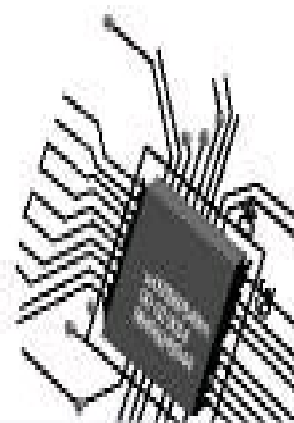
Duplázási idő: 1,5 év

Év

Megjegyzés: a DRAM-ok sebessége nőtt ez alatt az idő alatt.

A tranzisztorok átlagára

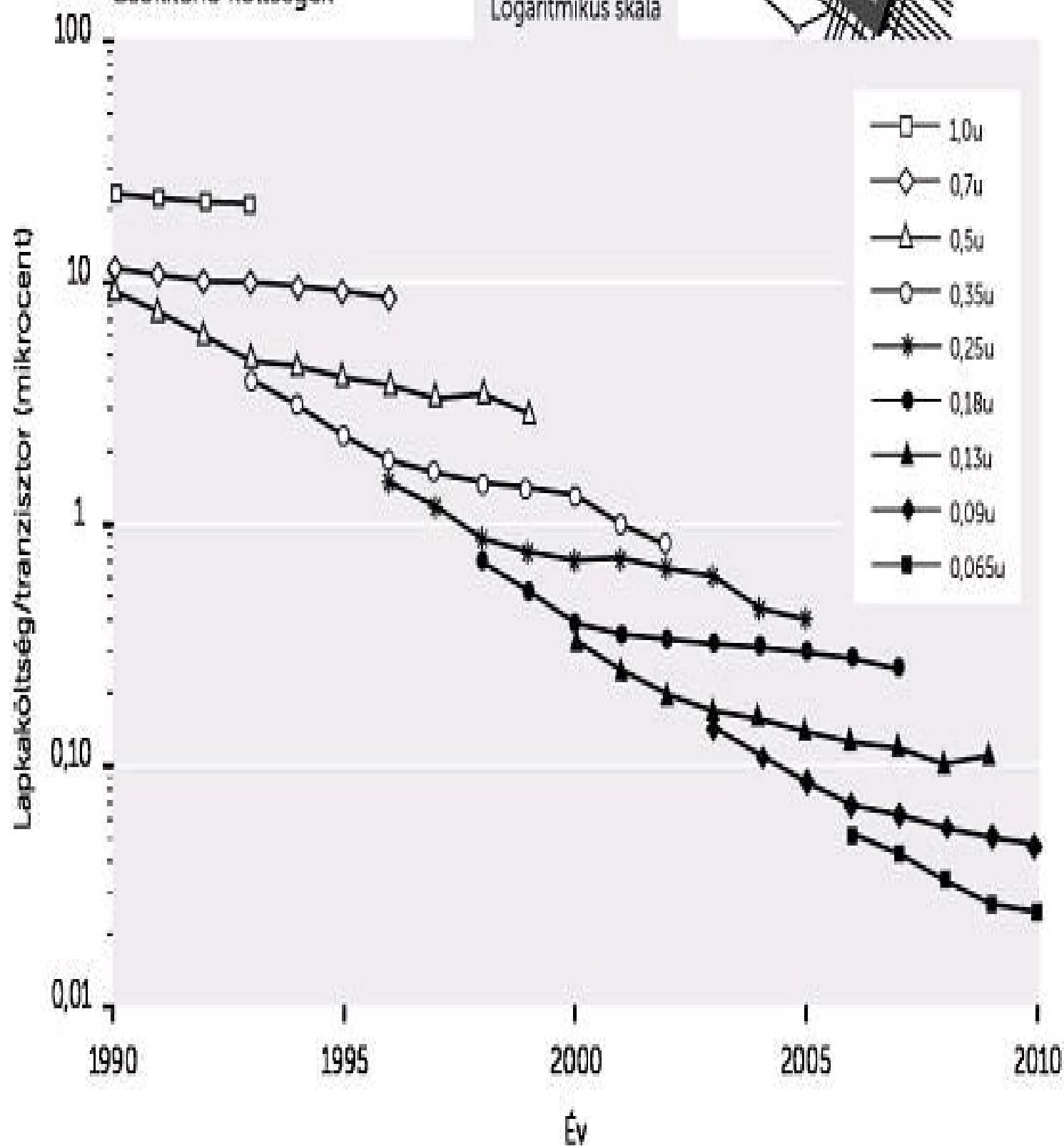
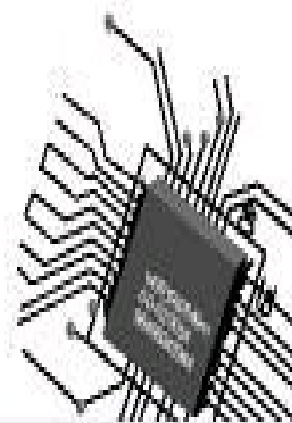
Logaritmus skála



Tranzisztorgyártás

Csökkenő költségek

Logaritmikus skála



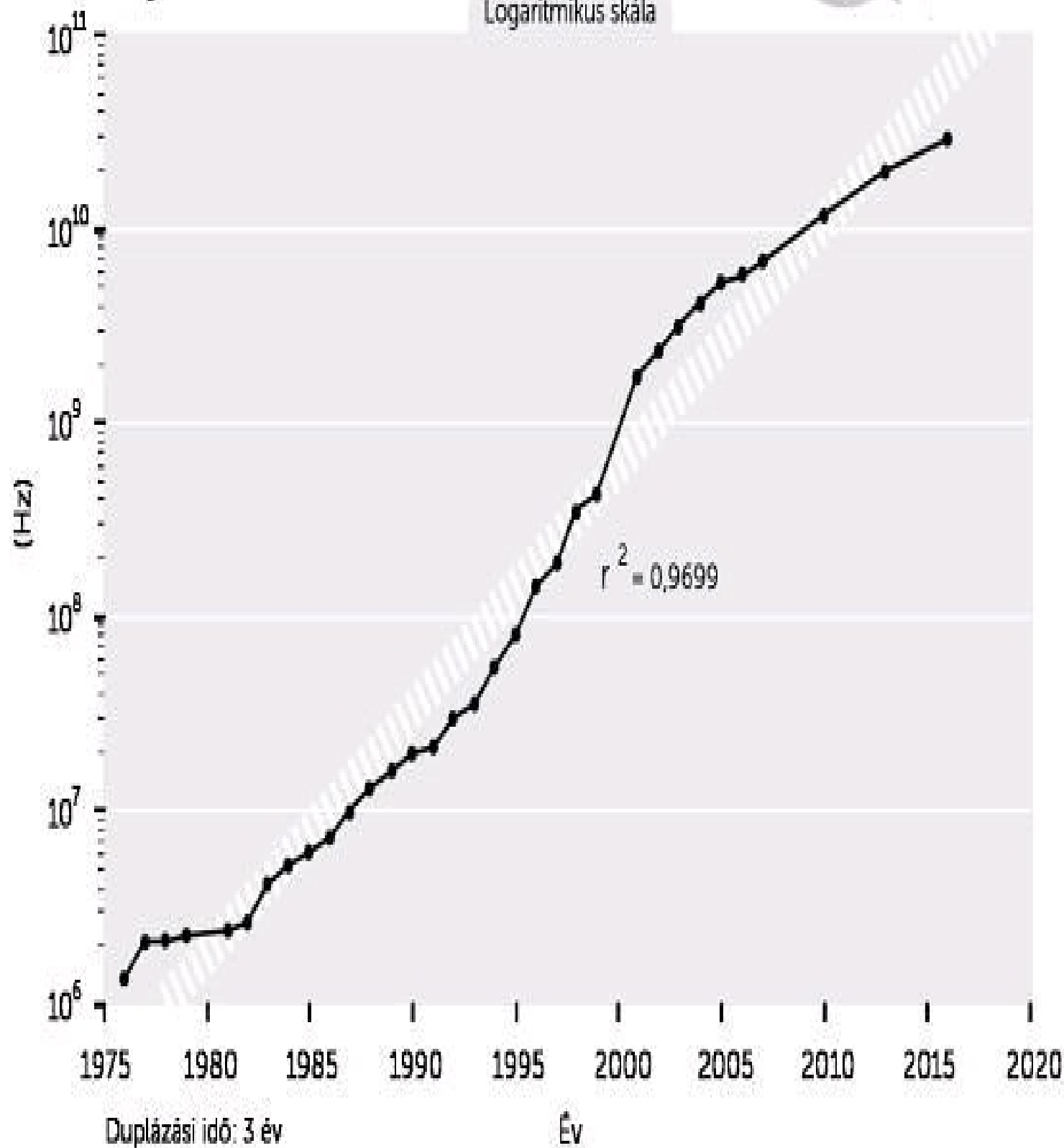
A félvezetők ár–teljesítmény-aránya csökkenésének ez a figyelemreméltóan egyenletes gyorsulása egy sor, egyre kisebb méreteket megvalósító gyártástechnológiai fázison ment át (amelyeket a csíkszélesség határozott meg). A csíkszélesség ma már száz nanométer alatt van, és ezt tartják a „nanotechnológia” küszöbének.^{68}

Gertrude Stein rózsájával ellentétben nem az a helyzet, hogy egy tranzisztor az egy tranzisztor, ami egy tranzisztor. Ahogy a tranzisztorok egyre kisebbek és olcsóbbak lettek, az elmúlt harminc év során körülbelül ezerszer gyorsabbakká is váltak (lásd az ábrát) – ismét csak azért, mert bennük az elektronoknak kisebb utat kell megtenniük.^{69}

Ha egyesítjük az egyre olcsóbb tranzisztorok és az egyre magasabb órajelek trendjeit, akkor azt láthatjuk, hogy a tranzisztor órajelciklusra eső költsége mindössze 1,1 évenként feleződik (lásd az ábrát).^{70} A tranzisztor órajelciklusra eső költsége pontosabb mértéke az ár–teljesítmény-aránynak, mert számításba veszi a sebességet és a kapacitást is. Azonban a tranzisztor órajelre eső költsége még mindig nem veszi tekintetbe a magasabb szintű tervezés (például a mikroprocesszor-tervezés) innovációit, amelyek növelik a számítási hatékonyságot.

A mikroprocesszorok órajele

Logaritmikus skála

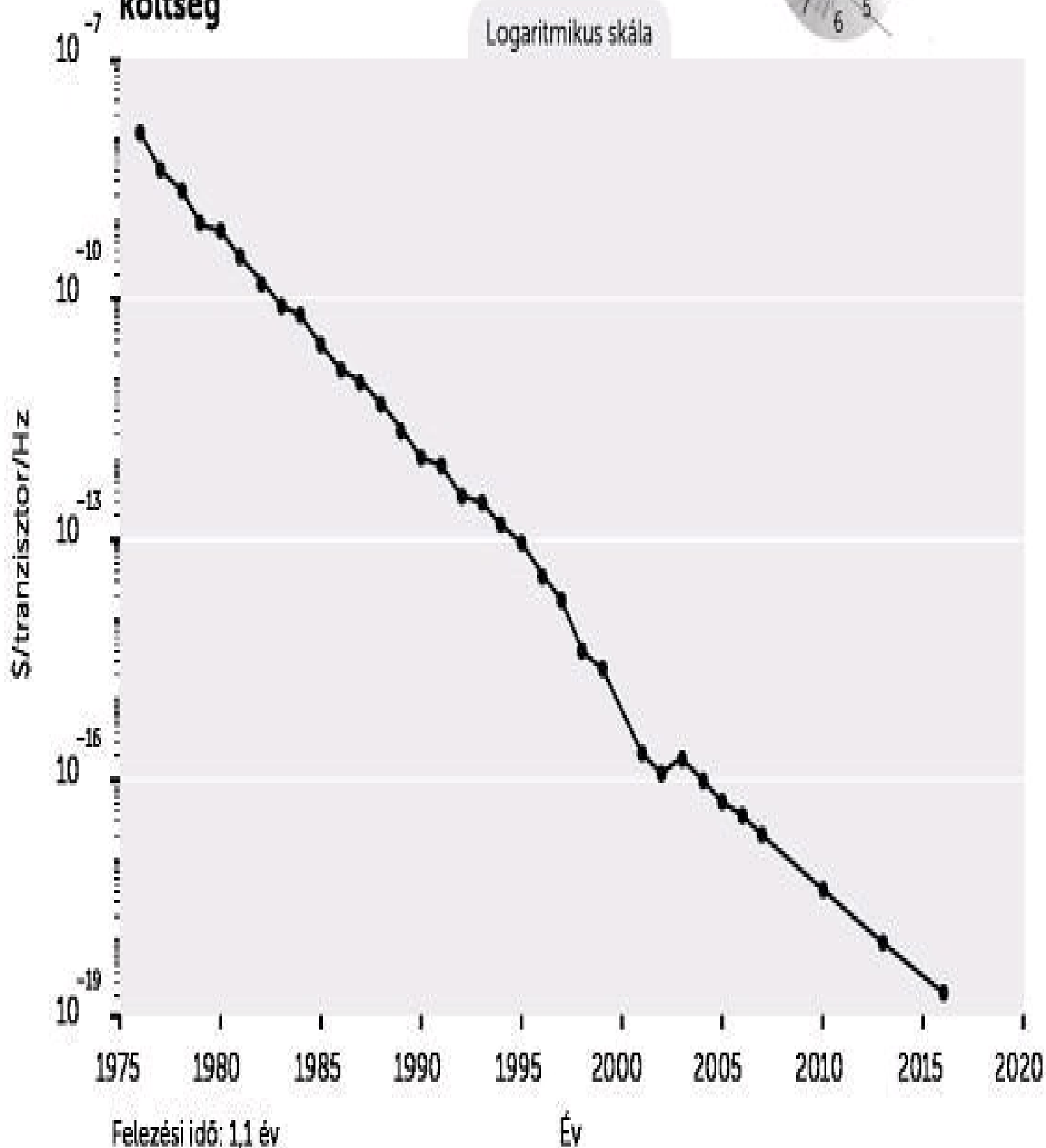


Az Intel processzorokban lévő tranzisztorok száma kétévente megduplázódott (lásd az ábrát). Több egyéb tényező is fellendítette az ár–teljesítmény-arányt, köztük az órajel, a mikroprocesszorok előállítási költsége és a processzortervezési újítások.^{[1711](#)}

A MIPS-ben (*million instruction per second* – másodpercenként elvégzett utasítások száma millióban) mért processzorteljesítmény minden 1,8 évben megduplázódott processzoronként (lásd az ábrát). Ismét csak megfigyelhetjük, hogy a kérdéses időszakban folyamatosan csökkent a processzorok előállítási költsége.^{[1721](#)}

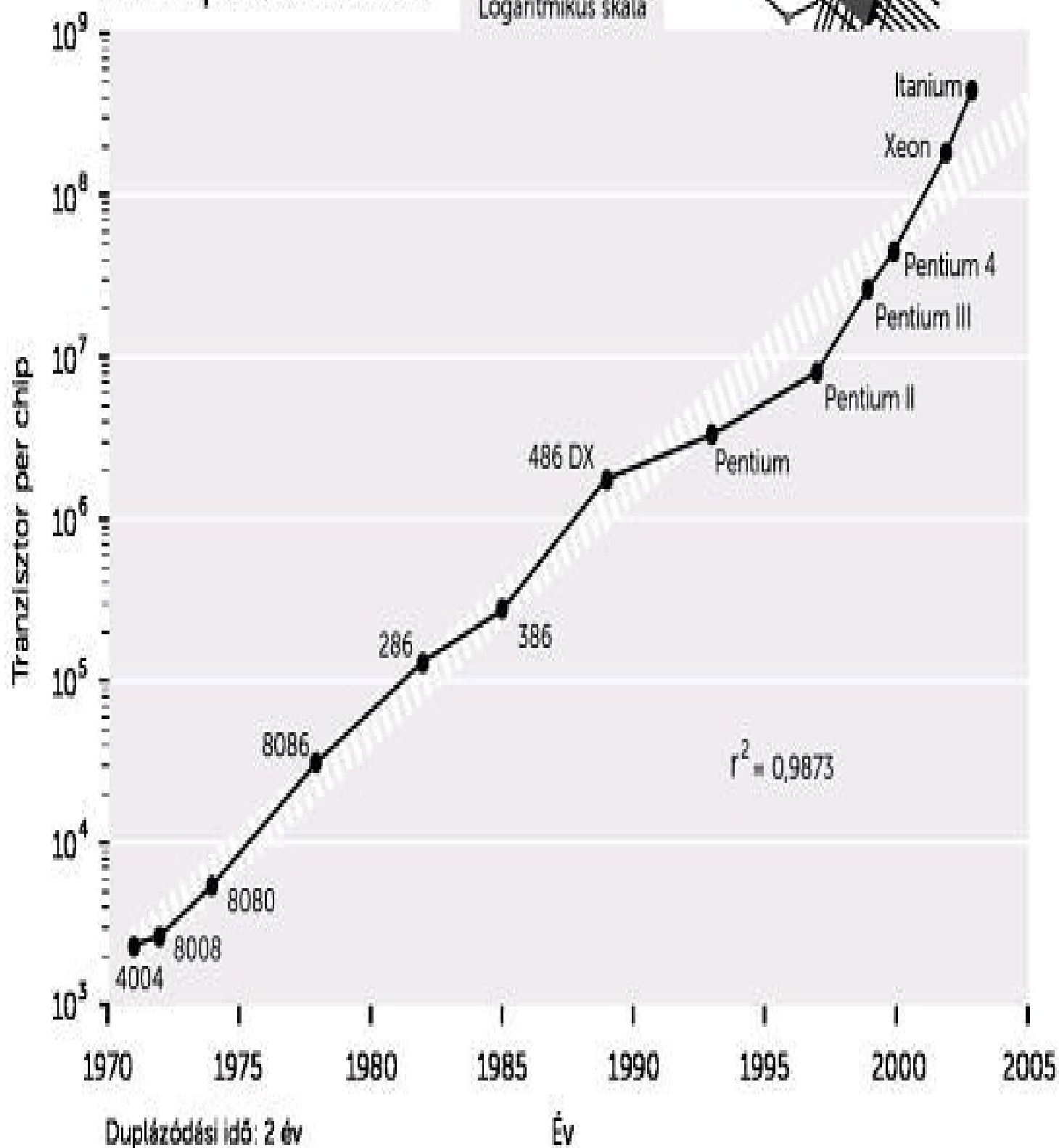
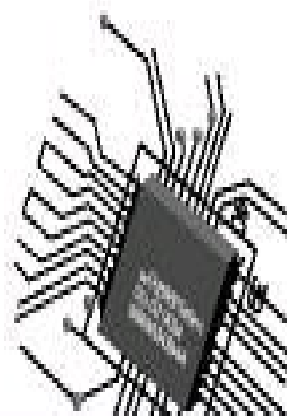
Mikroprocesszor- költség

Logaritmus skála



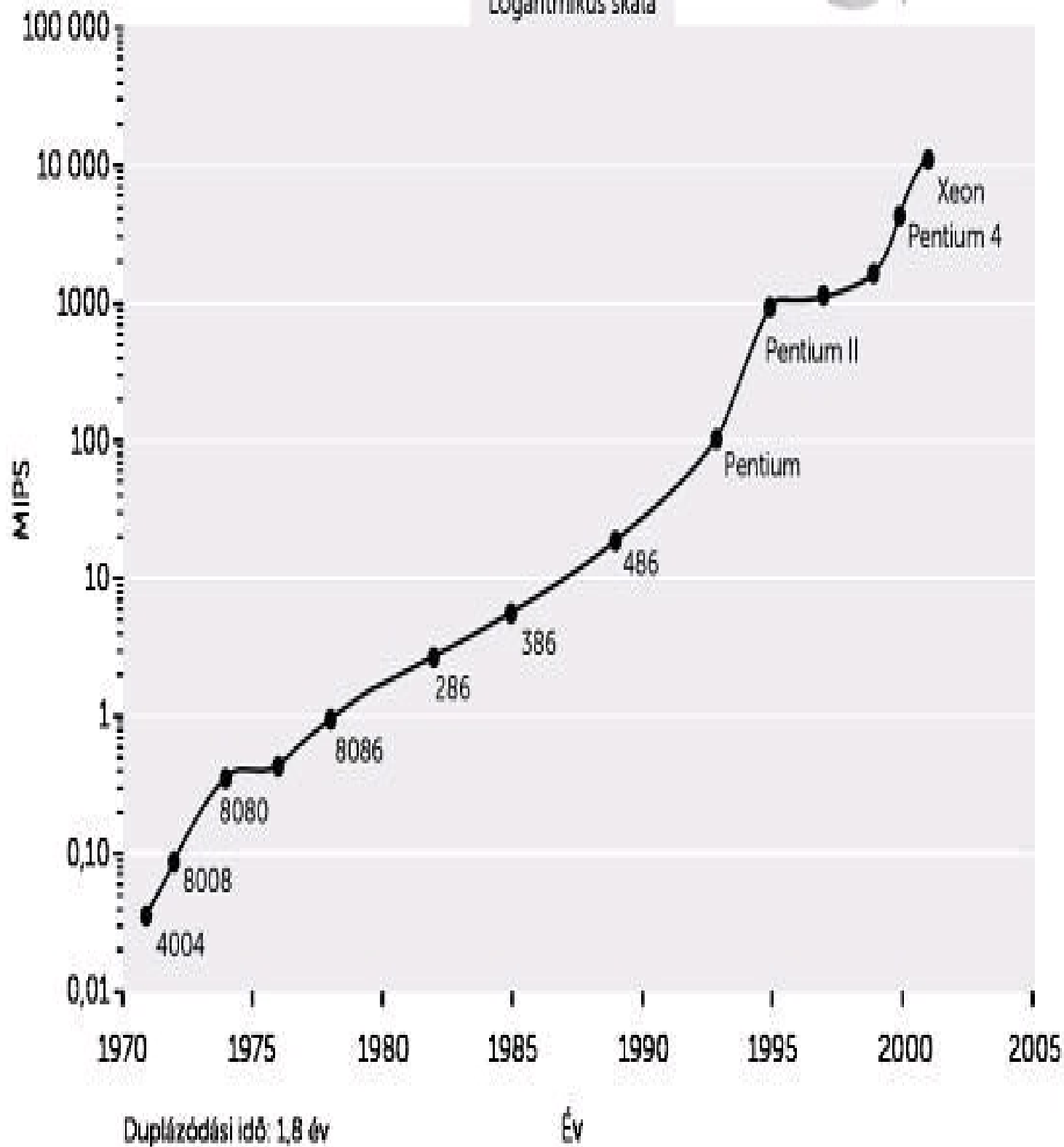
Tranzisztorok száma a mikroprocesszorokban

Logaritmikus skála



Processzorteljesítmény (MIPS)

Logaritmikus skála



Ha megvizsgálom az iparágban töltött negyvenvalahány évemet, össze tudom hasonlítani az 1960-as évek végén, egyetemista koromban a MIT-en használt számítógépet egy mai notebookkal. 1967-ben egy több millió dolláros IBM 7094-hez volt hozzáférésem, 32K (36 bites) szómemóriával és egynegyed MIPS processzorsebességgel. 2004-ben egy 2000 dolláros személyi számítógépet használtam, félmilliárd byte RAM-mal és körülbelül 2000 MIPS processzorsebességgel. Az MIT számítógépe ezerszer drágább volt, így a MIPS-re vetített költsége körülbelül nyolcmilliószorosa lehetett a személyi számítógépnek.

Mérték	IBM 7094 kb. 1967-ben	Notebook kb. 2004-ben
Processzorsebesség (MIPS)	0,25	2000
Memória (KByte)	144	256 000
Hozzávetőleges ár (2003-as dollárértéken)	11 000 000	2000

Duplázódási (vagy felezési) idők^[73]

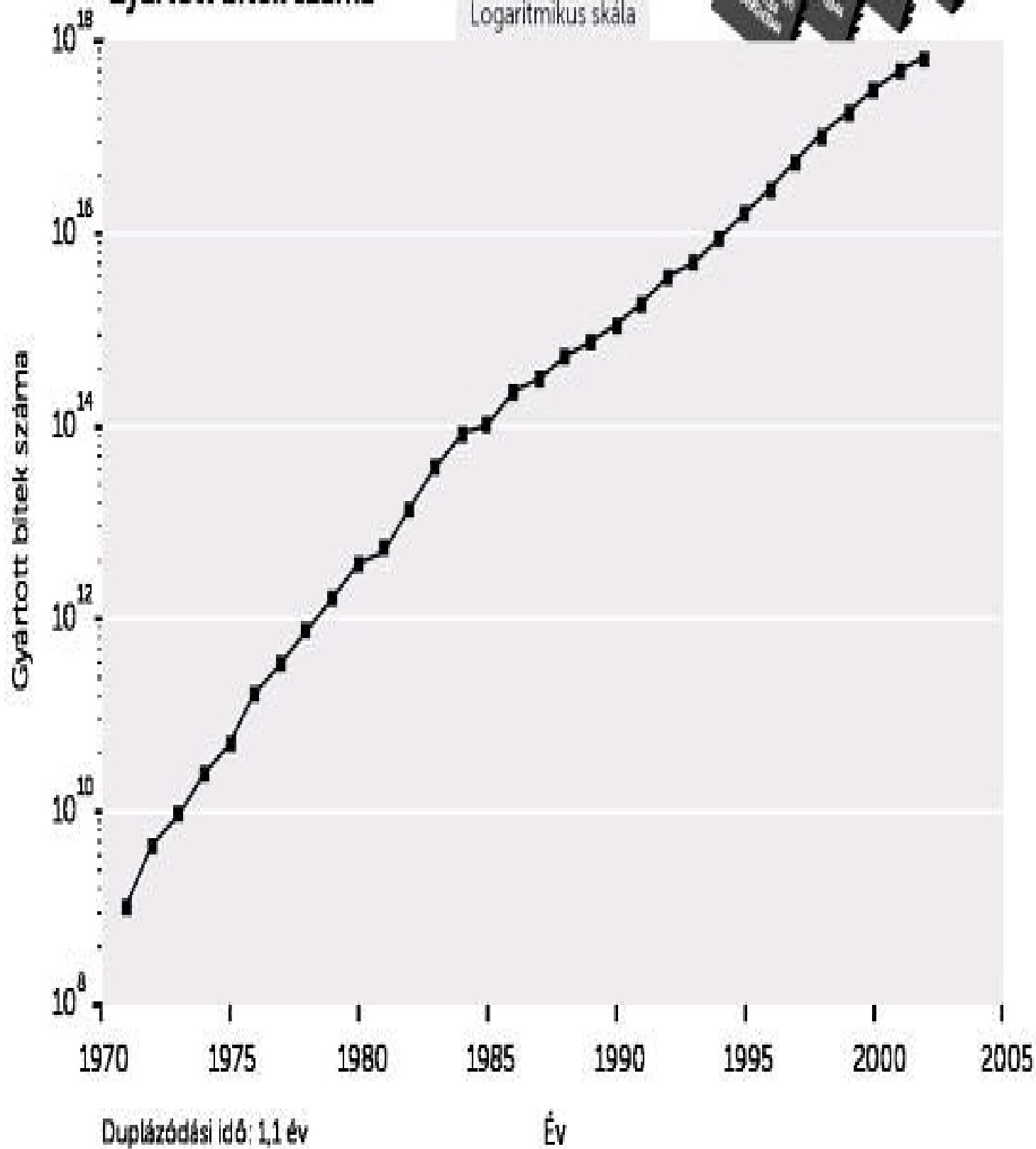
Dinamikus RAM „half pitch” csíkszélesség (legkisebb csíkszélesség)	5,4 év
Dinamikus RAM (bit per dollár)	1,5 év
A tranzisztorok átlagára	1,6 év
Mikroprocesszorár per tranzisztor-órajelciklus	1,1 év
Gyártott bitek száma	1,1 év
Processzorteljesítmény MIPS-ben	1,8 év
Tranzisztorok száma az Intel processzorokban	2,0 év
Mikroprocesszorok órajele	3,0 év

A jelenlegi számítógépem 2000 MIPS számítási sebességet biztosít körülbelül 2^{24} -szer alacsonyabb áron, mint az 1967-ben használt számítógép. Ez 24 duplázódás 37 év alatt, vagyis körülbelül 18,5 hónaponként egy duplázódás. Ha számításba vesszük a 2004-es számítógépem hozzávetőleg 2000-szer nagyobb RAM-jának megnövekedett értékét, a merevlemez tárolókapacitás óriási megnövekedését és sokkal erőteljesebb utasításkészletét, továbbá a kommunikációs sebesség hatalmas növekedését, a jobb szoftvereket és egyéb tényezőket is, akkor még kisebb lesz a duplázódási idő.

Az információtechnológia költségeinek hihetetlen deflációja ellenére a kereslet egyre nő. A legyártott bitek száma 1,1 évente megduplázódik, gyorsabban, mint ahogy az egy bitre jutó gyártási érték megfelelődik (1,5 év).^[74] Ennek eredményeképpen a félvezetőipar teljes árbevételét tekintve évi 18 százalékos növekedést élvezett 1958 és 2002 között.^[75] A teljes információtechnológiai (IT) ipar 1977-ben a bruttó nemzeti össztermék 4,2 százalékát, 1998-ban viszont már a 8,2 százalékát állította elő.^[76] Az IT egyre nagyobb befolyást szerez minden gazdasági szektorban. A legtöbb termék és szolgáltatás esetében az információs technológia által hozzáadott érték gyorsan növekszik. Még a leghétköznapiabb termékeknek, mint a székeknek és az asztaloknak is van információtartalmuk: a számítógéppel készült tervek, valamint a gyártásuk során használt készletnyilvántartó rendszerek és automata gyártósorok programjai.

Gyártott bitek száma

Logaritmikus skála



Moore törvénye: önbeteljesítő jóslat?

Egyes kutatók szerint Moore törvénye nem több, mint egy önbeteljesítő jóslat. Eszerint ha az ipar szereplői előre látják, hol kell tartaniuk egy adott időpontban, akkor ennek megfelelően szervezik a kutatásaikat és fejlesztéseiket. Jó példa erre az iparág saját ütemterve.^[77] Ugyanakkor az információtechnológia exponenciális trendjei sokkal szélesebb területet fednek le, mint Moore törvénye. Ugyanezt a trendet láthatjuk gyakorlatilag minden technológiában vagy mérésben, ami az információval foglalkozik, köztük sok olyan technológiával, amelyek esetében az ár-érték-arány gyorsuló javulása nem létezik vagy nem került még megfigyelésre (lásd lentebb). De még magában a számítástechnikában is sokkal általánosabb érvényű az egy alkatrészre jutó teljesítmény növekedése, mint amit Moore törvénye előre jelez.

Az ötödik paradigma^[78]

Moore törvénye igazából nem az első számítástechnikai rendszerekre vonatkozó paradigma. Jól látható ez, ha felrajzoljuk negyvenkilenc híres XX. századi számításvégző rendszer és számítógép ár-teljesítmény-arányát, a másodpercenként végrehajtott utasítások számát ezer (reálértéken vett) dollárra vetítve (lásd a következő ábrát).

Ahogy az ábra is mutatja, valójában négy különböző paradigma – az elektromechanikus, a relés, az elektroncsöves és a tranzistoros – növekedett exponenciálisan az ár-teljesítmény-arány tekintetében, jóval az integrált áramkörök feltalálása előtt. És nem Moore paradigmája lesz az utolsó. Amikor Moore törvénye eléri az S-görbéje végét, amit most 2020 előttre várnak, az exponenciális növekedés tovább fog folytatódni a hatodik paradigmával, a háromdimenziós molekuláris technológiával.

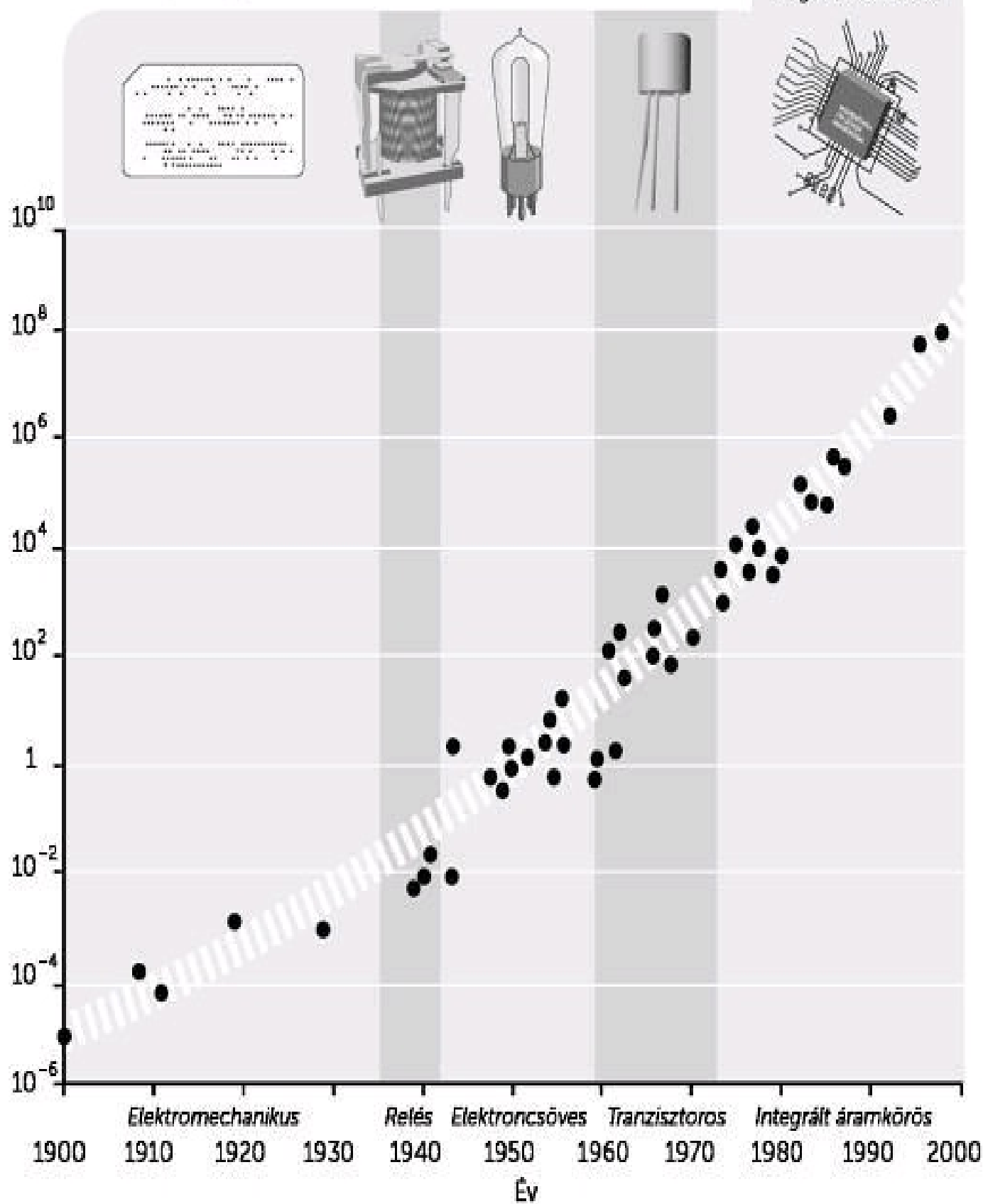
Figyeljük meg, hogy az ábrán exponenciális görbét láthatunk a logaritmikus skálán, ami arra utal, hogy az exponenciális növekedés két szinten zajlik.^[79] Más szóval van egy enyhe, de tisztán látható exponenciális növekedés az exponenciális növekedés *rátájában* is. (A logaritmikus skálán egy egyenes vonal egyszerű exponenciális növekedést jelez; egy felfelé görbülő vonal az egyszerű exponenciális növekedésnél nagyobb növekedést.) Mint láthatjuk, a XX. század kezdetén három év kellett a számítás ár-teljesítmény-aránya kétszeres javulásához, a közepén két év, jelenleg pedig körülbelül egy év.^[80]

Moore törvénye

Az ötödik paradigma

Logaritmus skála

A másodpercenként elvégzett számítások száma ezer dollárba vetítve



Fraktáldimenziók és az agy

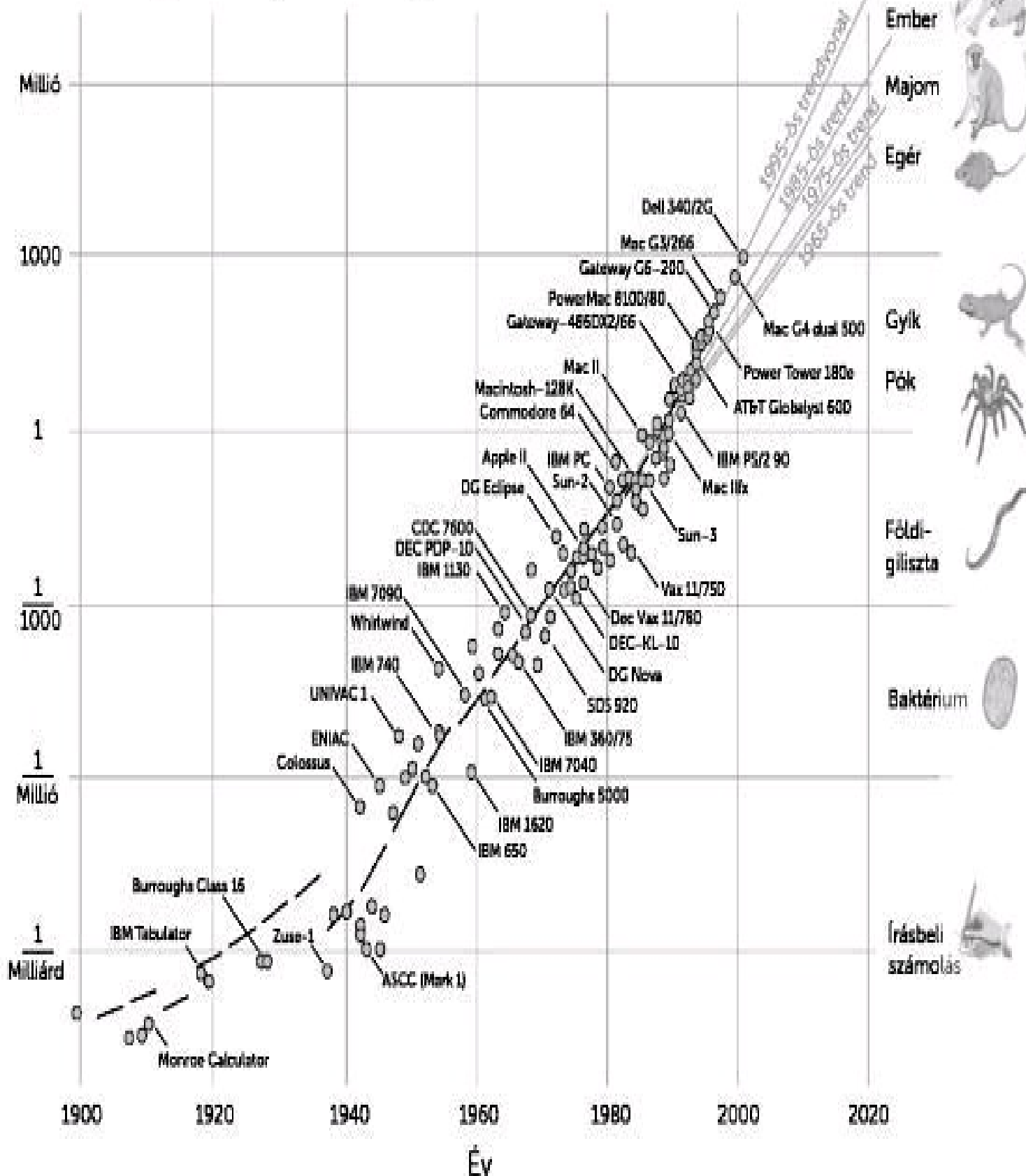
Meg kell jegyeznünk, hogy a harmadik dimenzió felhasználása a számítástechnikai rendszerekben nem vagy-vagy döntés, hanem átmenet a két és a három dimenzió között. A biológiai intelligencia szempontjából az emberi agykéreg valójában meglehetősen lapos, mindössze hat vékony rétegből áll, amelyek redőzöttsége jelentősen megnöveli a felszínüket. Ez a redőzöttség a harmadik dimenzió kihasználásának az egyik módja. A „fraktálrendszerekben” (azokban a rendszerekben, amelyekben iteratív módon helyettesítődik be egy minta vagy egy redőzőszabály) a bonyolult, önmagukba visszahajló alakzatokat úgy tekintik, mint amelyek törtszám dimenziójúak. Ebből a szempontból az emberi agykéreg redőzött felszínének dimenziószáma kettő és három közé esik. Más agyi részek, például a kisagy háromdimenziósak, ám egy lényegében kétdimenziós ismétlődő struktúra építi fel őket. Valószínű, hogy a jövő számítási rendszereiben egyszerre lesznek jelen erősen redőzött kétdimenziós és teljesen háromdimenziós struktúrák.

Hans Moravec is készített egy hasonló ábrát (lásd a következő oldalon), amely más, de az előzőeket részben átfedő számítógépeket tüntet fel, és különböző időpontokban veszi fel az emelkedő trendvonalakat. Akárcsak a fenti ábrán, a vonalak egyre meredekebbek az idő múlásával, tükrözve az exponenciális növekedés második színjét.^{[\[81\]](#)}

A számítógép ár-teljesítmény-evolúciója

1000 dollárnyi számítógépnek megfelelő agyi teljesítmény

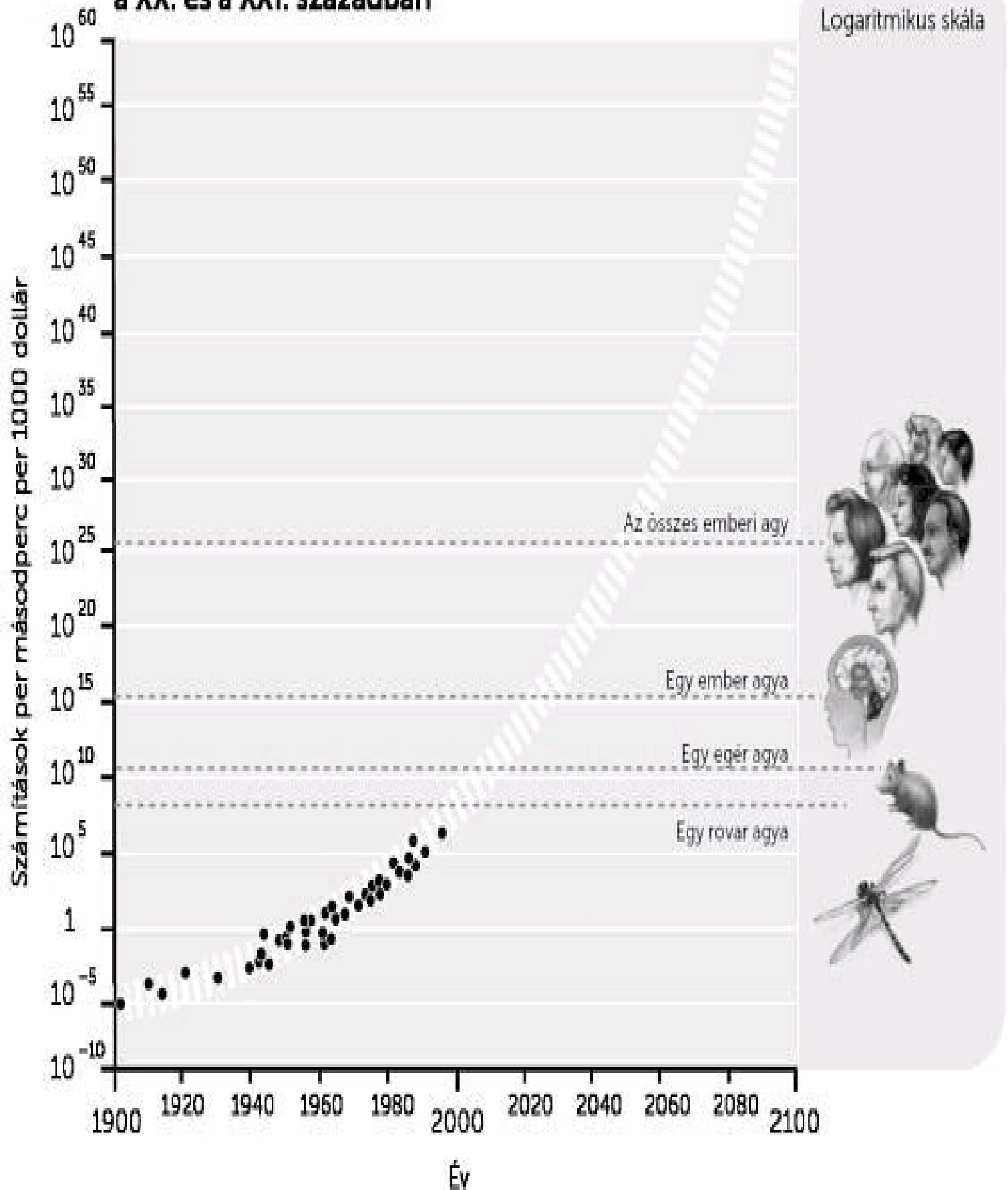
MIPS per 1000 dollár (1998-as árfolyamon)



Ha kivetítjük a számítási teljesítmény trendjeit erre az új évszázadra, akkor a következő oldalon lévő ábrán azt láthatjuk, hogy a szuperszámítógépek ennek az évtizednek a végére elérik az emberi agy kapacitását, a személyi számítógépek pedig 2020 körül – vagy talán korábban, attól függően, mennyire konzervatív becslést alkalmazunk az emberi agy kapacitására. (Az emberi agy számítási sebességére vonatkozó becsléseket a következő fejezetben tárgyaljuk.)^[82]

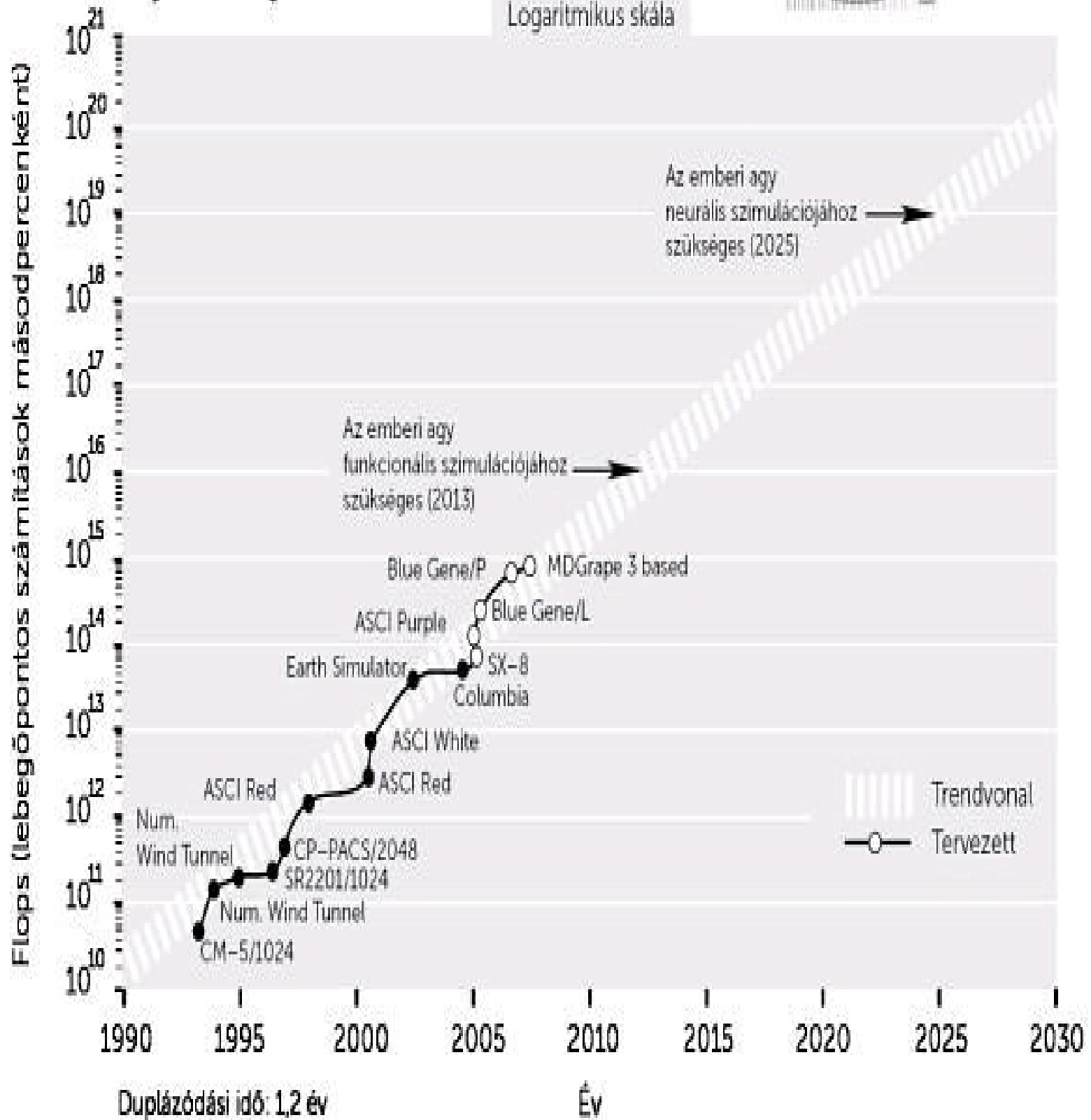
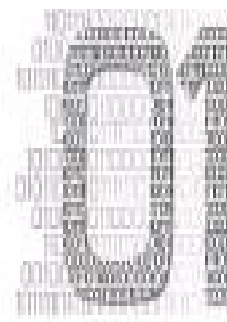
A számítási teljesítmény exponenciális növekedése csodálatos kvantitatív példa az evolúciós folyamatok exponenciálisan növekedő megtérüléseire. A számítási kapacitás exponenciális növekedését kifejezhetjük a fejlődés gyorsulásával is: míg kilencven év kellett az első MIPS per ezer dollár eléréséhez, jelenleg ötóránként egy MIPS per ezer dollár a növekedés mértéke.^[83]

A számítási kapacitás exponenciális növekedése a XX. és a XXI. században



Az IBM Blue Gene/P szuperszámítógépe a tervek szerint 2007-es megjelenésekor egymillió gigaflopos lesz^{[\[4\]](#)} (milliárd lebegőpontos műveletre képes másodpercenként), vagyis másodpercenként 10^{15} számítást fog elvégezni.^{[\[84\]](#)} Ez az egytizede az emberi agy emulálásához szükséges másodpercenkénti 10^{16} számításnak (lásd a következő fejezetet). És ha extrapoláljuk ezt az exponenciális görbét, a másodpercenkénti 10^{16} számítást a következő évtized elején érjük el.

Növekedés a szuperszámítógépek teljesítményében



Ahogy azt korábban említettem, Moore törvénye csak az adott méretű integrált áramkörön lévő tranzisztorok számára vonatkozik, sőt néha még szűkebb értelemben, a tranzisztorok csíkszélességére alkalmazva használják. Ám az ár-teljesítmény-arány nyomon követésének legmegfelelőbb eszköze az egységárra eső számítási sebesség, mely index az „okosság” (az innováció, azaz a technológiai evolúció) sok szintjét számításba veszi. Az integrált áramkörökben megnyilvánuló fejlesztéseken kívül a számítógép-tervezésben még sokrétű fejlesztések zajlanak (például a futószalag-feldolgozás, a párhuzamos feldolgozás, az utasítások előreolvasása, az utasítások és a memória átmeneti gyorsítótárba helyezése, és sok egyéb).

Az emberi agy egy nagyon kevésbé hatékony, elektrokémiai alapokon felépülő, digitális vezérlésű analóg számítási folyamatot alkalmaz. Számításainak nagy része az idegsejtek közötti kapcsolatokban körülbelül másodpercenkénti kétszáz műveletes sebességgel zajlik (minden egyes kapcsolat esetében), ami legalább egymilliószor lassabb, mint a jelenlegi elektronikus áramkörök számítási sebessége. Az agy azonban elképesztő képességekkel rendelkezik szélsőségesen párhuzamos, *háromdimenziós* felépítése miatt. Sok olyan technológia áll jelenleg kifejlesztés alatt, melyek háromdimenziós áramköröket fognak használni, ezekről a következő fejezetben szólok.

Felvetődhet a kérdés, van-e eredendő korlátja a számítási folyamatok támogatására fordítható anyag- és energiakapacitásnak. Ez lényeges kérdés, de ahogy a következő fejezetben látni fogjuk, majd csak ennek a századnak a végén fogjuk megközelíteni ezt a határt. Fontos különbséget tenni az egy-egy konkrét technológiai paradigmára jellemző S-görbe, illetve a technológia széles területein – mint például a számítástechnikában – működő evolúciós folyamat folyamatos exponenciális növekedése között. Az egyes paradigmák, mint például Moore törvénye, valóban eljutnak olyan szintekre, amelyeken az exponenciális növekedés már nem folytatható. Ám a számítástechnika növekedése meghaladja az összes ezt támogató alapvető paradigmaét, és tárgyalásunk szempontjából folyamatos exponenciálisnak tekinthető.

A gyorsuló megtérülések törvényével összhangban a paradigmaváltás (amit innovációnak is nevezünk) bármely adott paradigma S-görbéjét folyamatos exponenciális görbévé teszi. Egy új paradigma, mint például a háromdimenziós áramkörök, akkor válik uralkodóvá, amikor a régi eléri természetes korlátait, ami legalább négyszer megtörtént már a számítástechnika történetében. A nem emberi fajok – mint például a majmok – esetében az eszközkészítés vagy -használat tudományát minden egyes állatnál egy S alakú tanulási görbe jellemzi, amely hirtelen véget ér; ezzel szemben az ember által teremtett technológia a fogantatása óta exponenciális mintázatú növekedést és gyorsulást követ.

DNS-szekvenálás, emlékezet, kommunikáció, az internet és a miniatürizálás

„A civilizáció azáltal halad előre, hogy egyre bővíti azoknak a fontos műveleteknek a számát, amelyeket gondolkodás nélkül képesek vagyunk végrehajtani.”

(Alfred North White, 1911^[85])

„Ennyire még soha nem álltak úgy a dolgok a történelem során, mint most.”

(Dwight D. Eisenhower)

A gyorsuló megtérülések törvénye minden technológiára vonatkozik, sőt minden evolúciós folyamatra. Az információalapú technológiák esetében azért lehet meglehetősen pontossággal

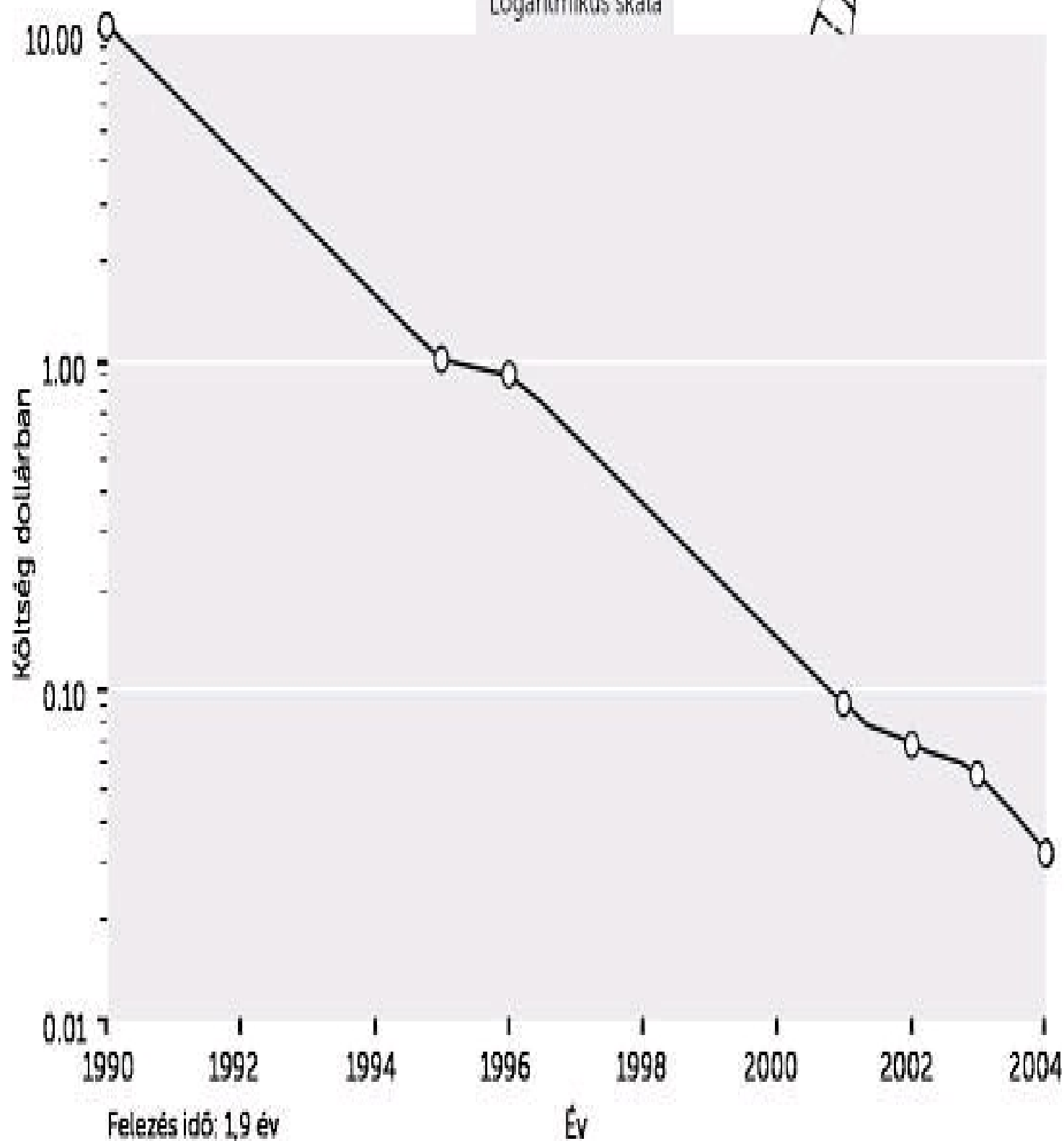
felvázolni, mert jól meghatározott mutatóink vannak (például az egy másodperc alatt elvégzett műveletek száma egy dollárra vetítve, vagy az egy másodperc alatt elvégzett műveletek száma egy grammra vetítve) arra, hogy megmérjük őket. A gyorsuló megtérülések törvényéből következő exponenciális növekedésre számos egyéb példa létezik még, a legkülönbözőbb területekről, a mindenféle elektronikától kezdve a DNS-szekvenáláson, a kommunikáción, az agyi képalkotáson, az agy működésének és szerkezetének visszafejtésén, az emberi tudás nagyságán és hatókörén át egészen a villámgyorsan zsugorodó méretekkel operáló technológiáig. Ez utóbbi trend közvetlen kapcsolatban áll a nanotechnológiával.

A jövőbeli GNR-kor (genetika, nanotechnológia, robotika, lásd 5. fejezet) nem kizárólag a számítástechnika exponenciális robbanásából fog kinőni, hanem a számtalan összefonódó technológiai fejlesztés kölcsönhatásából és miriádnyi szinergiájából. Mivel a technológia diadalmenetét megalapozó exponenciális növekedési görbék minden pontja az innováció és a verseny egy-egy intenzív emberi drámáját jelképezi, figyelemre méltónak kell tartanunk, hogy ezek a kaotikus folyamatok ilyen egyenletes és előre jelezhető exponenciális trendeket hoznak létre. Ez nem véletlen, hanem az evolúciós folyamatok inherens jellegzetessége.

A DNS-szekvenálás költségei

(befejezett bázispárra vetítve)

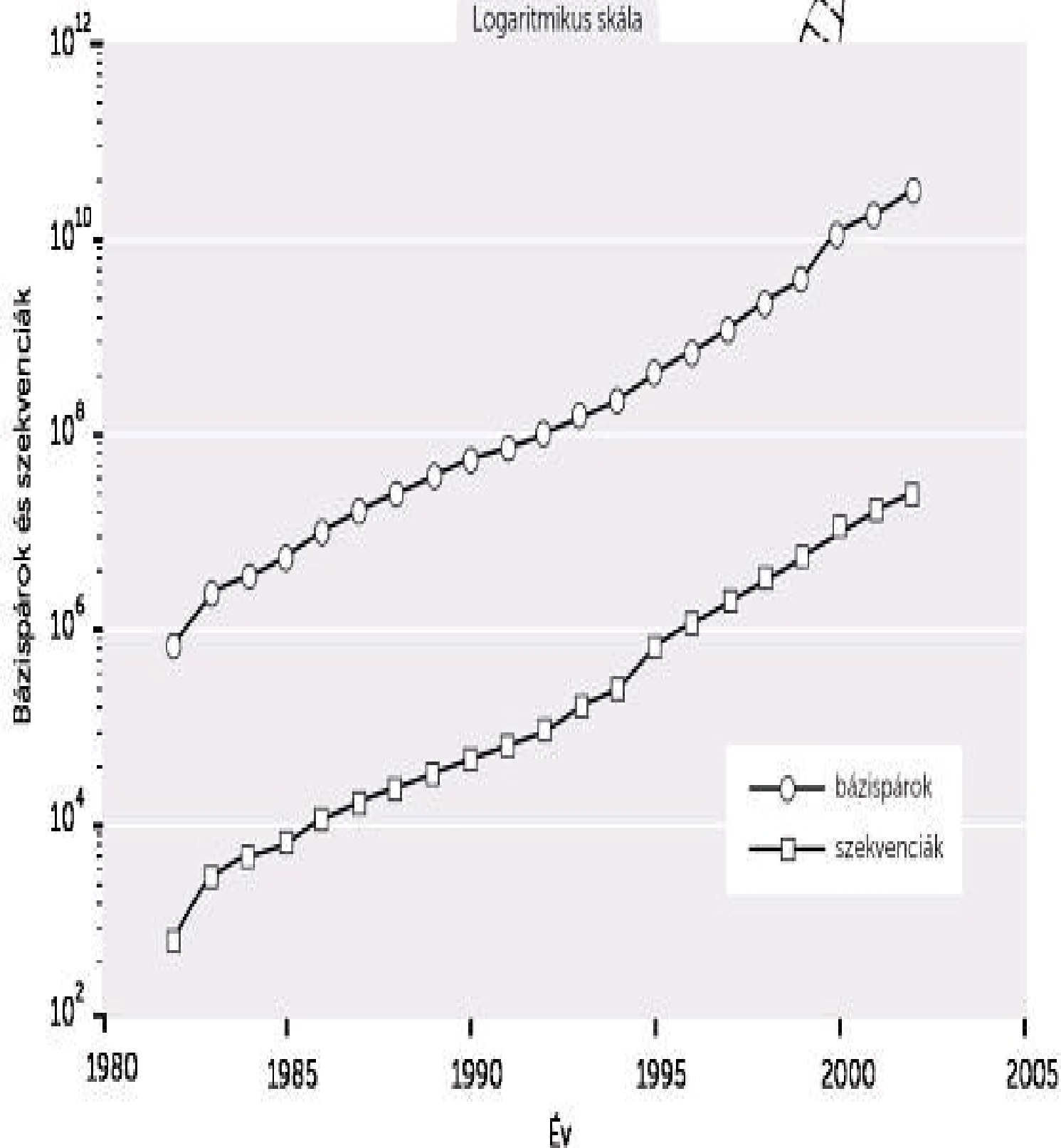
Logaritmus skála



A génbank növekedése

DNS-szekvencia-adatok

Logaritmus skála



Amikor 1990-ben elindult az emberi génkészlet feltérképezése, a kritikusok azt mondták, hogy az akkori tempóban több ezer évre lesz szükség a projekt befejezéséhez. Mégis, a tizenöt évre tervezett munkát valamivel a kitűzött határidő előtt, a 2003-ban kiadott első változattal sikerült befejezni.^[86] A DNS-szekvenálás költsége az 1990-es bázispáronkénti tíz dollárról 2004-re két centre esett, és továbbra is gyorsan csökken (lásd az ábrát).^[87]

Az összegyűjtött DNS-szekvencia-adatokban egyenletes exponenciális növekedés mutatkozott (lásd az ábrát).^[88] Erre a megnövekedett kapacitásra drámai példa volt a közelmúltban a SARS-vírus szekvenálása, ami mindössze harmincegy napot vett igénybe a vírus azonosítása után. A HIV-vírus esetében ez több mint tizenöt évig tartott.^[89]

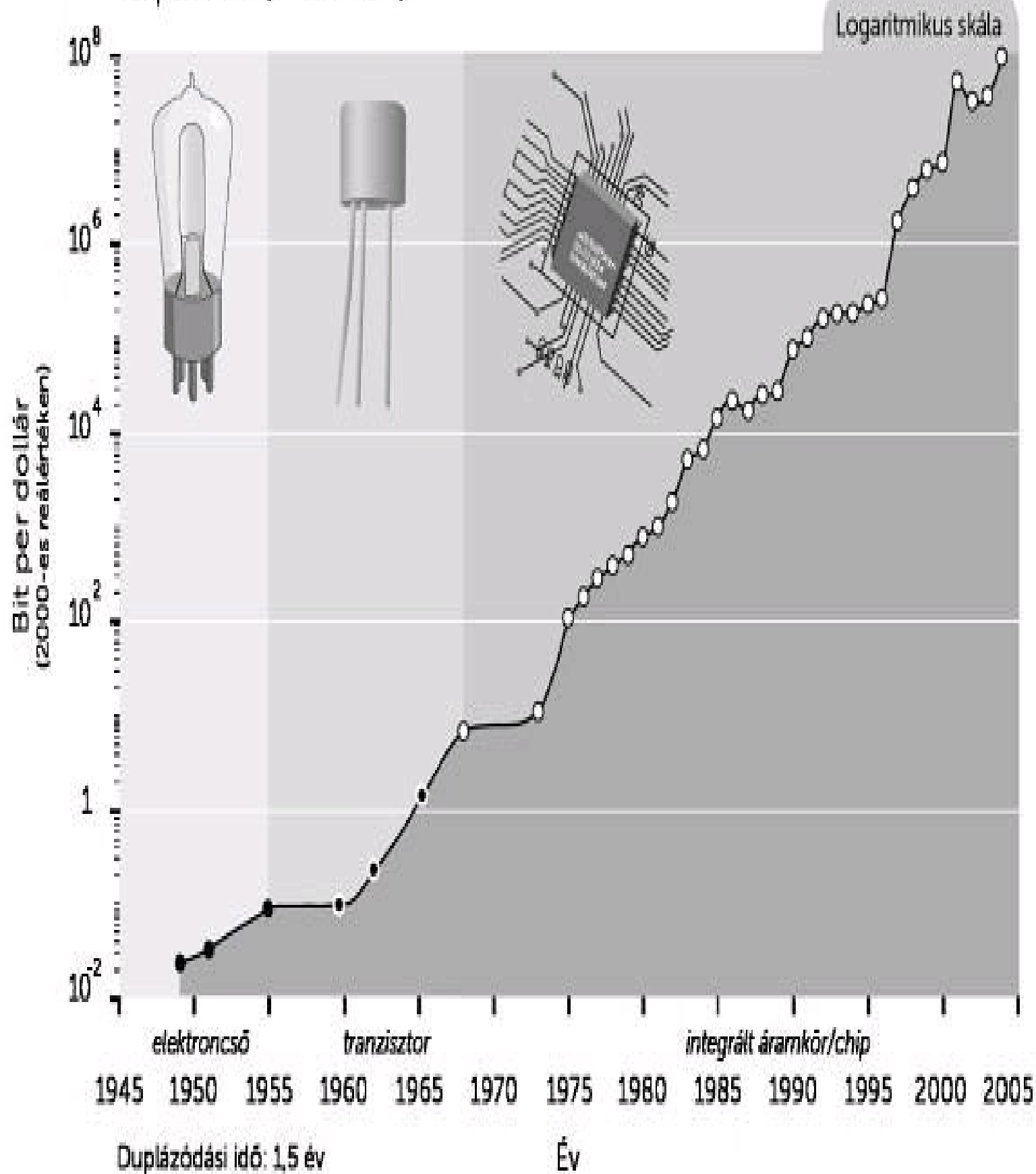
Az természetes, hogy az elektronikus memóriák, például a RAM esetében exponenciális növekedésre számítunk. Ám figyeljük meg, hogy a következő oldali ábrán látható logaritmikus grafikon egyenletesen emelkedik a különböző technológiai paradigmákon át: az elektroncsőtől a tranzisztoron át az integrált áramkörig.^[90]

Ugyanakkor a mágneses memória (a lemezmeghajtók) ár–teljesítmény-arányának javulása nem Moore törvényének az eredménye. Ez az exponenciális trend az adatoknak egy mágneses felületre való zsúfolását jelöli, nem pedig a tranzisztorokét egy integrált áramkörre – teljesen más technológiai kihívás, amivel más mérnökök és más vállalatok birkóztak meg.^[91]

A kommunikációtechnológia, az információközlő eszközök exponenciális növekedése (lásd a következő ábrát) sok éven át még a számítástechnikai feldolgozásnál vagy memóriakapacitásnál is kirobbanóbb volt, és következményeit tekintve legalább olyan jelentős. Ez a fejlődés is sokkal többről szól, mint arról, hogy tranzisztorokat zsúfolnak egy integrált áramkörre – egyre gyorsuló előrelépéseket jelent az üvegszálak vezetékek, az optikai kapcsolók, az elektromágneses technológiák és egyéb tényezők területén.^[92]

Véletlen hozzáférésű memória (RAM)

Bit per dollár (1949–2004)

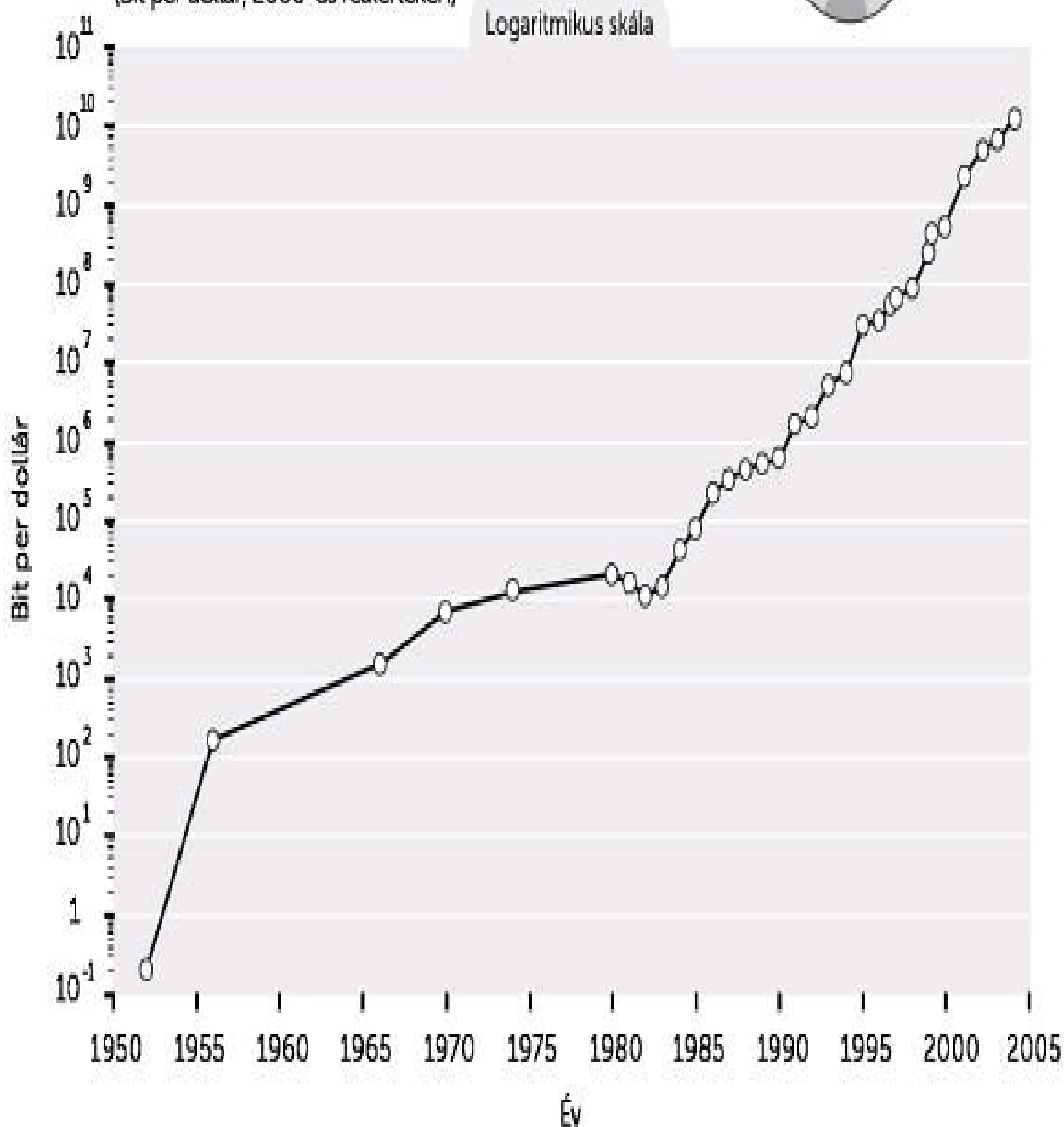
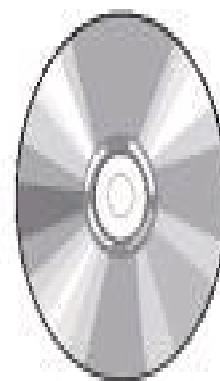


A tíz-tizenegy hónaponként megduplázódó teljesítményű (lásd az ábrát) vezetékek nélküli technológiáknak köszönhetően a városainkban és mindennapi életünkben egyre inkább elszakadunk a kábeldzsungelektől.

A számok az internet növekedését mutatják a kiszolgálók (webszerverek) száma alapján. Az oldal két ábrája ugyanazokat az adatokat ábrázolja, ám az egyik logaritmikus, a másik lineáris skálán. Ahogy arról már szoltunk, bár a technológia exponenciálisan növekszik, mi lineárisan érzékeljük. A legtöbb megfigyelő szempontjából ezen a területen semmi sem történt az 1990-es évek közepéig, amikor látszólag a semmi közepéből kirobbant a World Wide Web és az e-mail. Ám azt, hogy az internet világszerte elterjedt jelenség lesz, könnyen meg lehetett jósolni az internet elődjének, az ARPANET-nek az 1980-as évek elején megfigyelt exponenciális trendjéből. ^[93] A bal alsó grafikon ugyanazokat az adatokat ábrázolja lineáris skálán. ^[94]

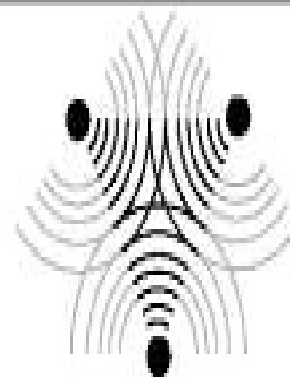
A mágneses memória kapacitása

(Bit per dollár, 2000-es reálértéken)

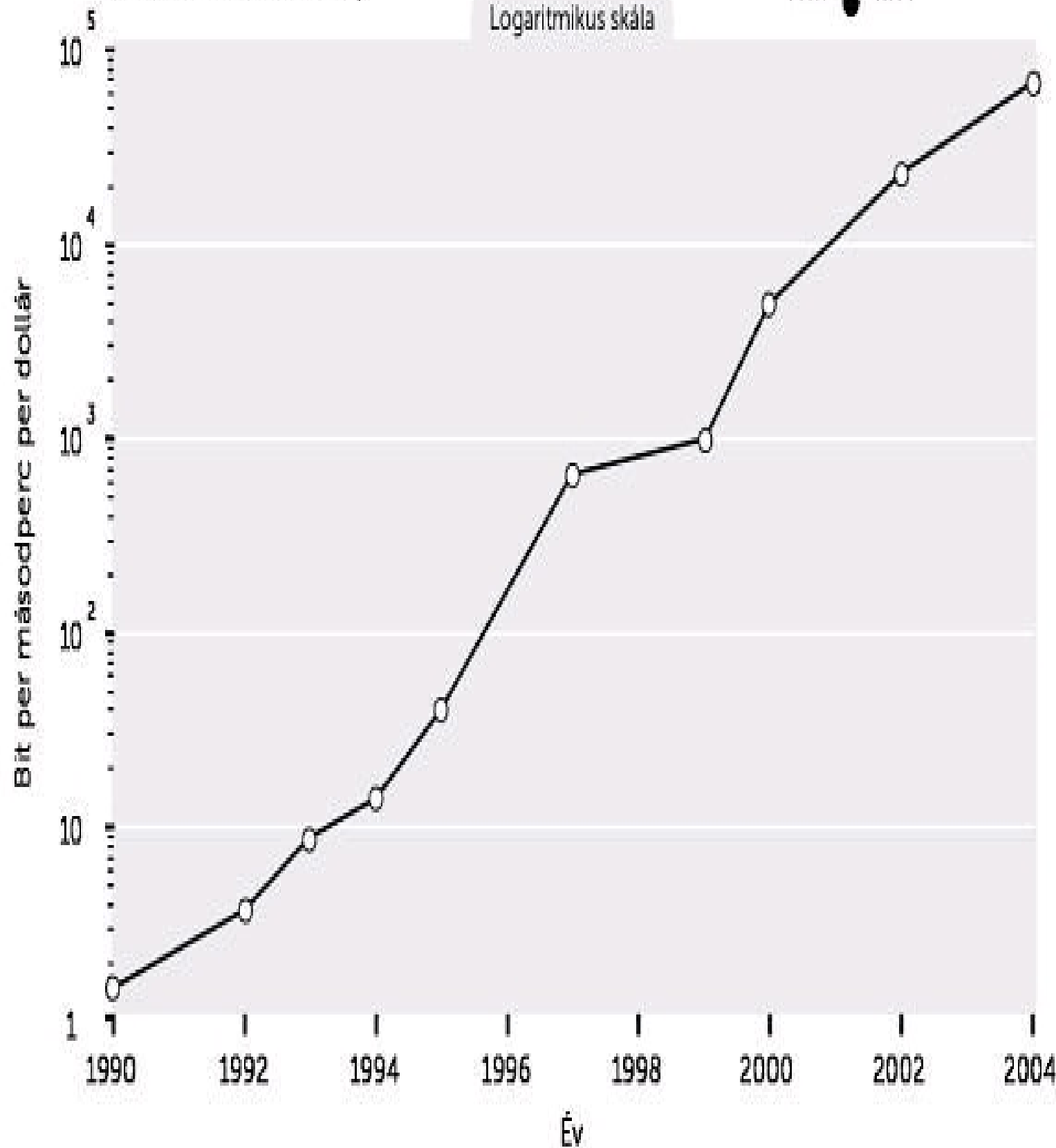


Ár–teljesítmény-arány

(Vezeték nélküli
adattovábbító eszközök)

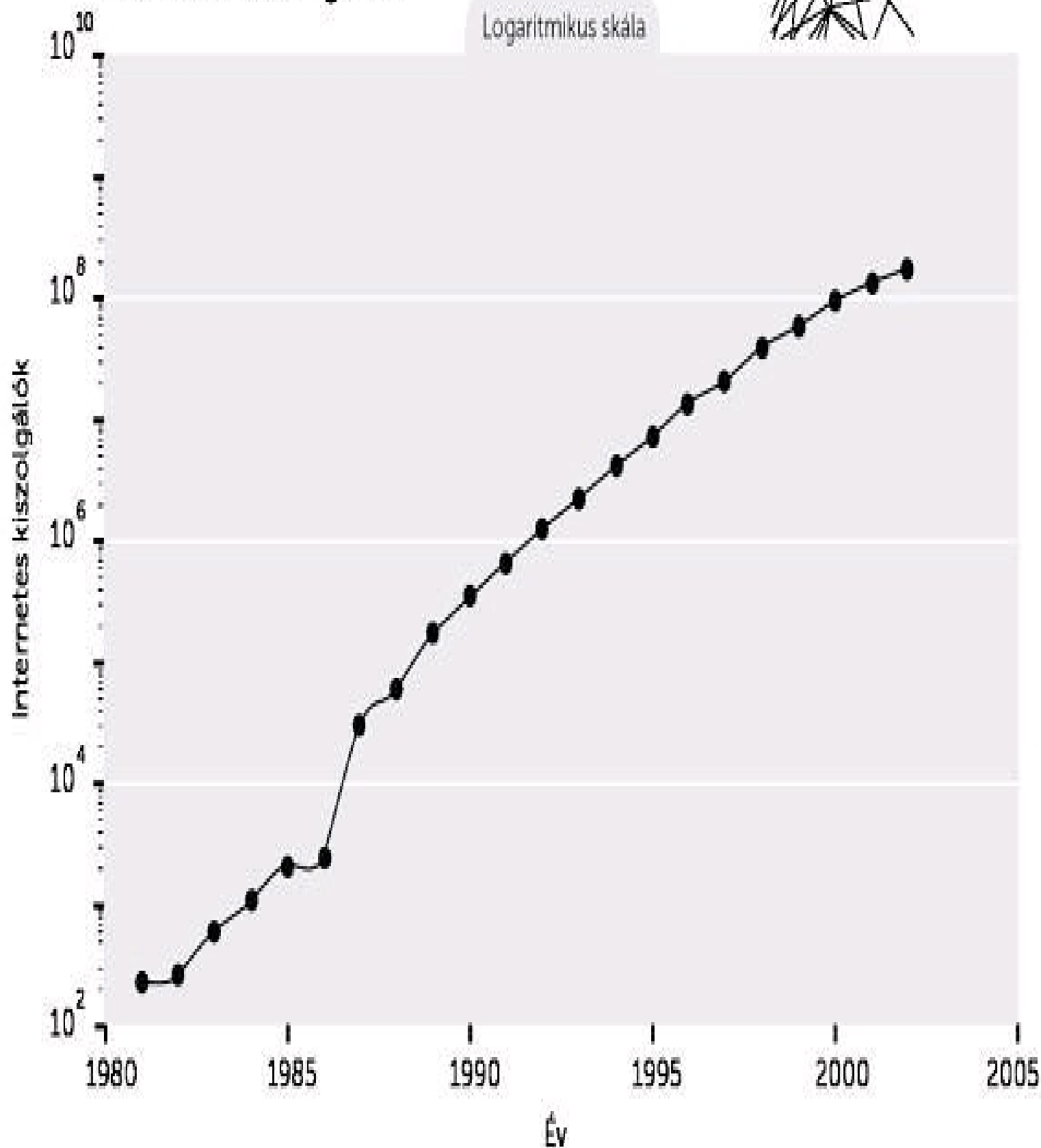
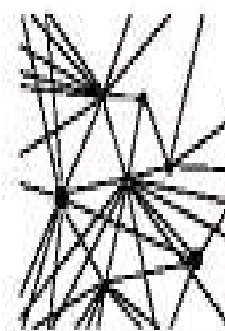


Logaritmikus skála



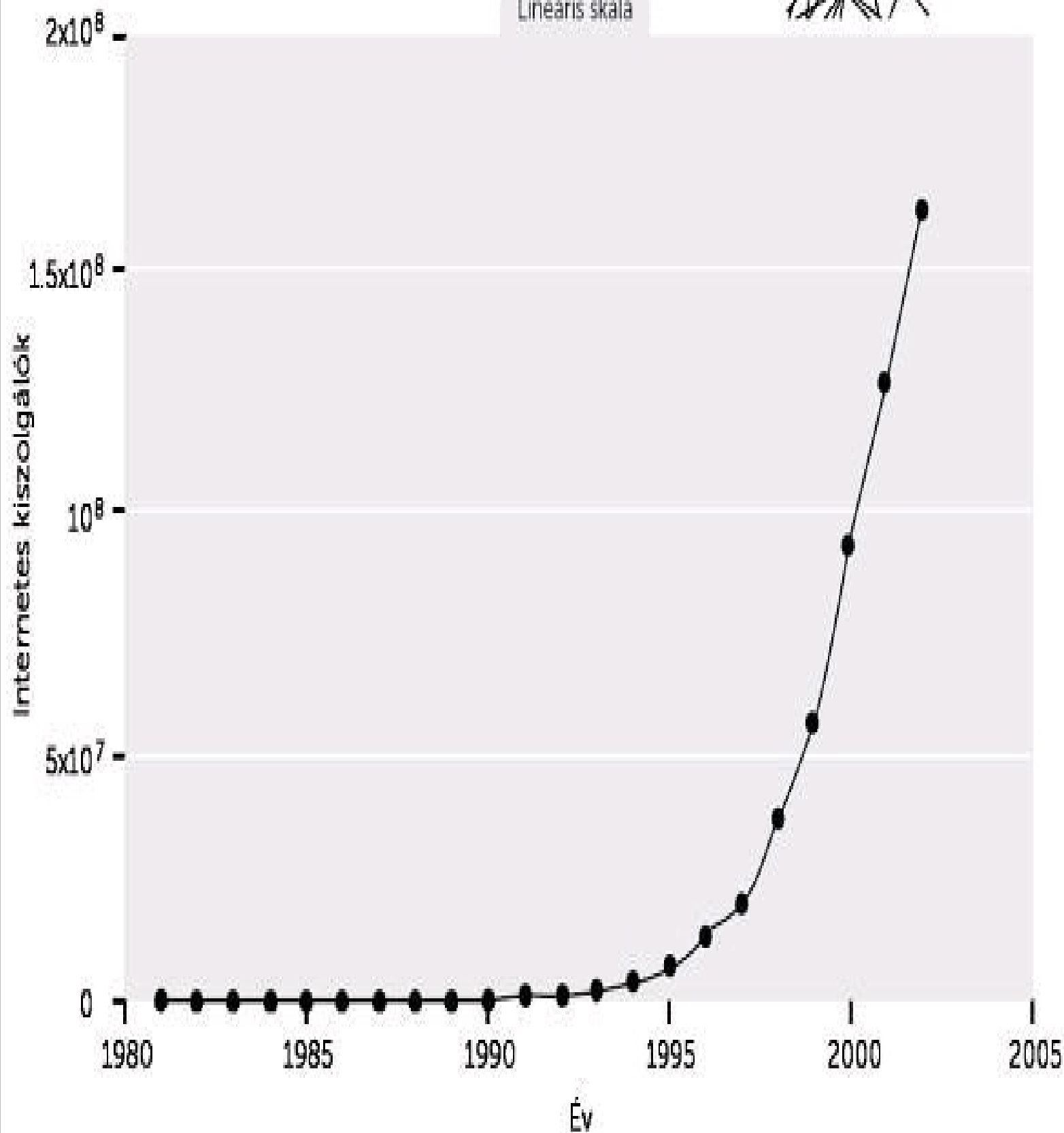
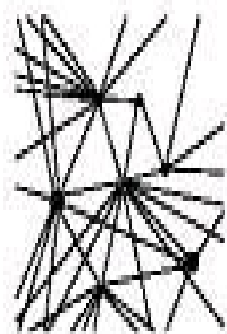
Internetes kiszolgálók

Logaritmikus skála



Internetes kiszolgálók

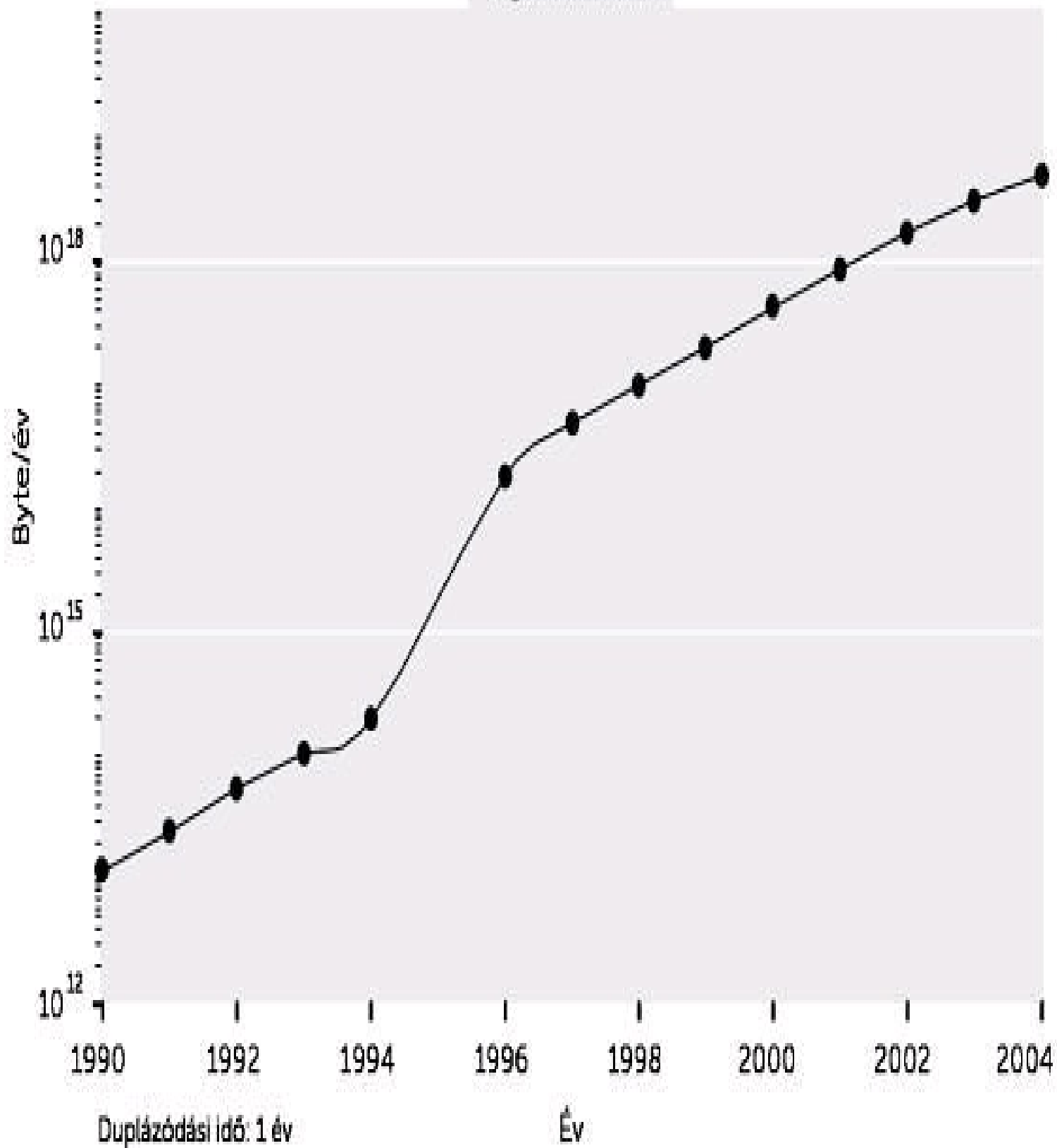
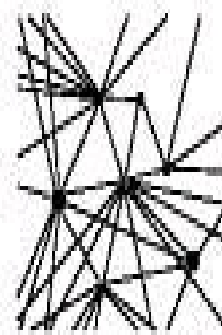
Lineáris skála



A kiszolgálók mellett az internet adatforgalma is évről évre megduplázódott.^[95] Ennek az exponenciális növekedésnek a biztosításához az internet gerinchálózatának (a ténylegesen az internet fenntartásához használt leggyorsabb ismert kommunikációs gerinccsatornák alapján) az adatátviteli sebessége is exponenciálisan növekedett. Figyeljük meg, hogy az internet gerinchálózati sávszélesség növekedését bemutató ábrán tulajdonképpen S-görbéket látunk: a gyorsulást felfordította egy új paradigma, amit a görbe ellaposodása követett, ahogy a paradigma elvesztette a lendületét, majd egy paradigmaváltás nyomán újabb gyorsulás következett.^[96]

Az internet adatforgalma

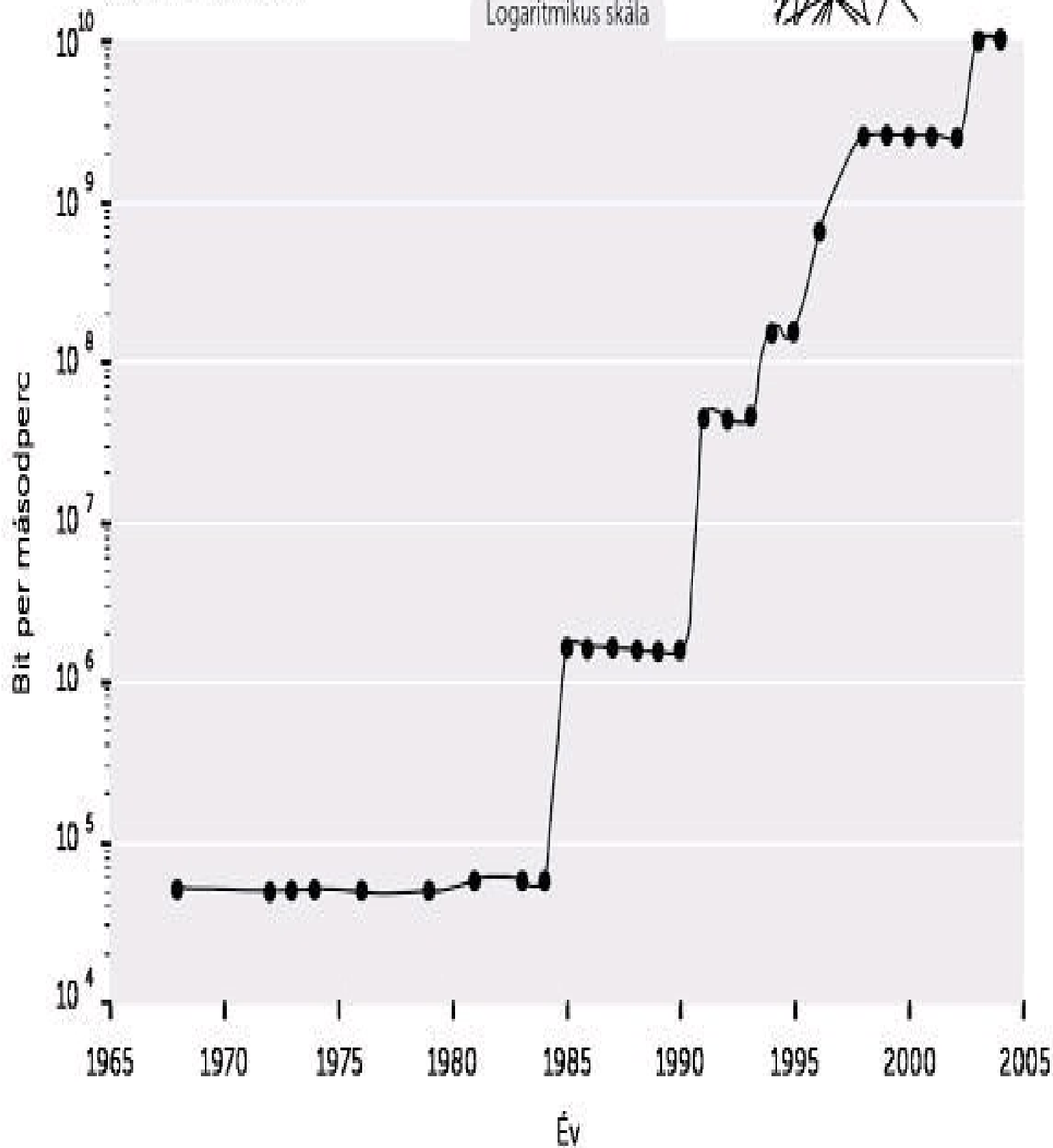
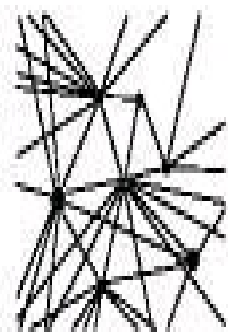
Logaritmikus skála



Internet-gerinchálózati sávszélesség

(bit per másodperc)

Logaritmikus skála



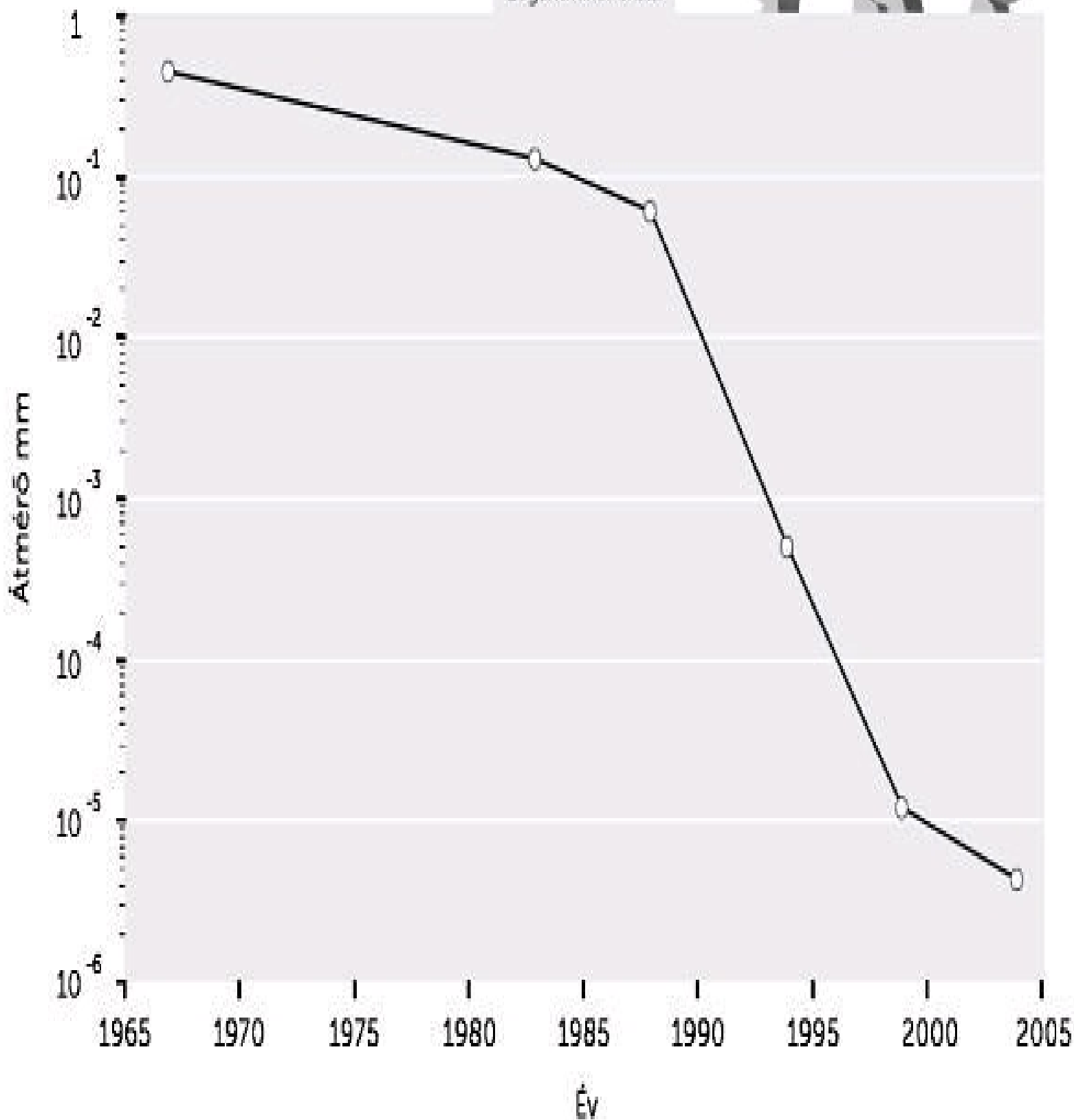
A másik trend, amelynek komoly hatása lesz a XXI. századra nézve, a mindent átható miniatürizálási törekvés. Az elektronikus és mechanikus technológiák széles körének folyamatosan csökken a – kulcsfontosságú jellemzőnek számító – mérete, még hozzá exponenciális arányban. Jelenleg a lineáris dimenziók mentén körülbelül évtizedenként négyszeres méretcsökkenés zajlik. Ez a miniatürizálás a Moore-törvény mögött rejlő hajtóerő is, de minden elektronikus rendszer méretében megnyilvánul – például a mágneses adattároló eszközökében. Ezt a méretcsökkenést láthatjuk a mechanikus eszközök esetében is, ahogyan azt a mechanikus eszközök méretváltozásait bemutató ábra is illusztrálja.^[97]

Azt, hogy számos technológia legfőbb gyártási méretei elkerülhetetlenül a száznál kevesebb, alig néhány nanométeres (a méter egymilliárdod része) nagyságrend felé tartanak, gyorsan növekedő érdeklődés kíséri a nanotechnológia iránt. A nanotechnológiai tudományos hivatkozások jelentősen megszaporodtak az elmúlt évtizedben.^[98]

A mechanikus eszközök méretcsökkenése

(átmérő mm-ben)

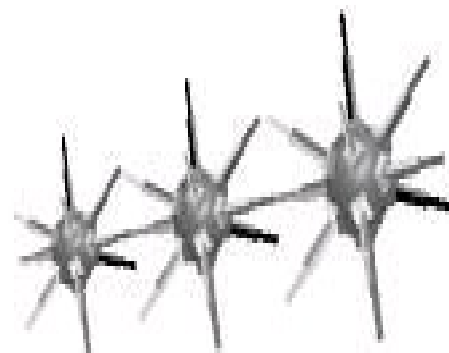
Logaritmikus skála



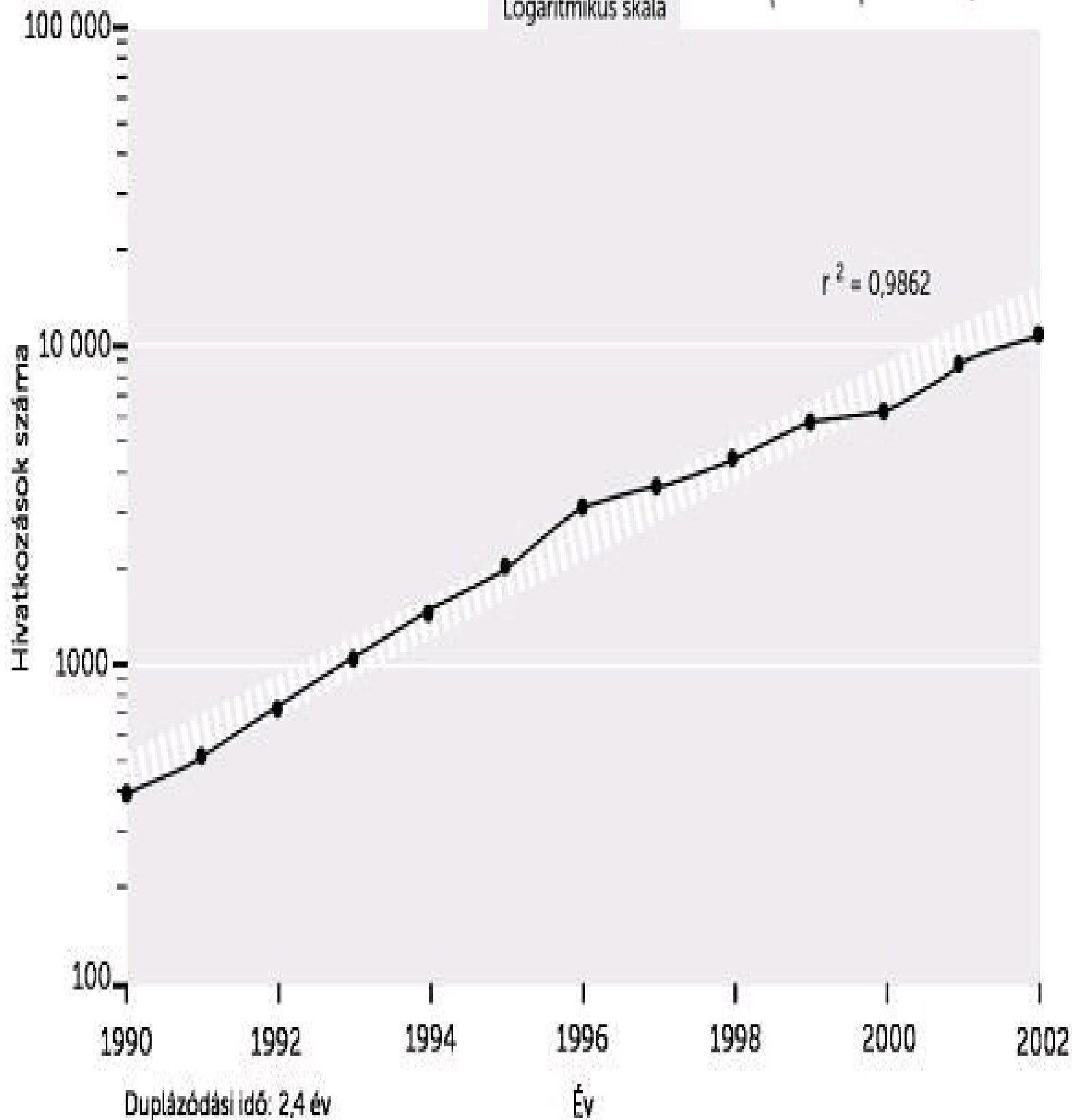
Ugyanez a jelenség figyelhető meg a nanotechnológiával kapcsolatos szabadalmak esetében is. ^[99]

Ahogy arra az ötödik fejezetben ki fogunk térni, a genetikai (vagy biotechnológiai) forradalom átviszi az információs forradalmat annak exponenciálisan növekvő teljesítményével és javuló ár-teljesítmény-arányával együtt a biológia területére. Hasonlóképpen, a nanotechnológiai forradalom át fogja vinni az információ fölötti egyre gyorsabban növekvő uralmat az anyagokra és a mechanikus rendszerekre. A robotikai (vagy „erős MI”) forradalom magában foglalja az emberi agy visszafejtését, ami azt jelenti, hogy informatikai nyelvre fordítjuk az emberi intelligenciát, majd egyesítjük a kapott eredményeket az egyre nagyobb teljesítményű számítástechnikai platformokkal. Így az ennek az évszázadnak az első felét uraló, egymást átfedő három átalakulás – a genetikai, a nanotechnológiai és a robotikai – az információs forradalom három aspektusát fogja képviselni.

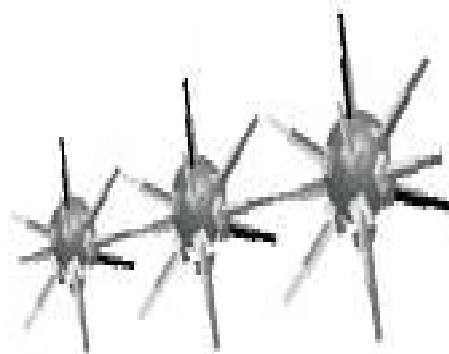
Nanotechnológiai tudományos hivatkozások (1990–2002)



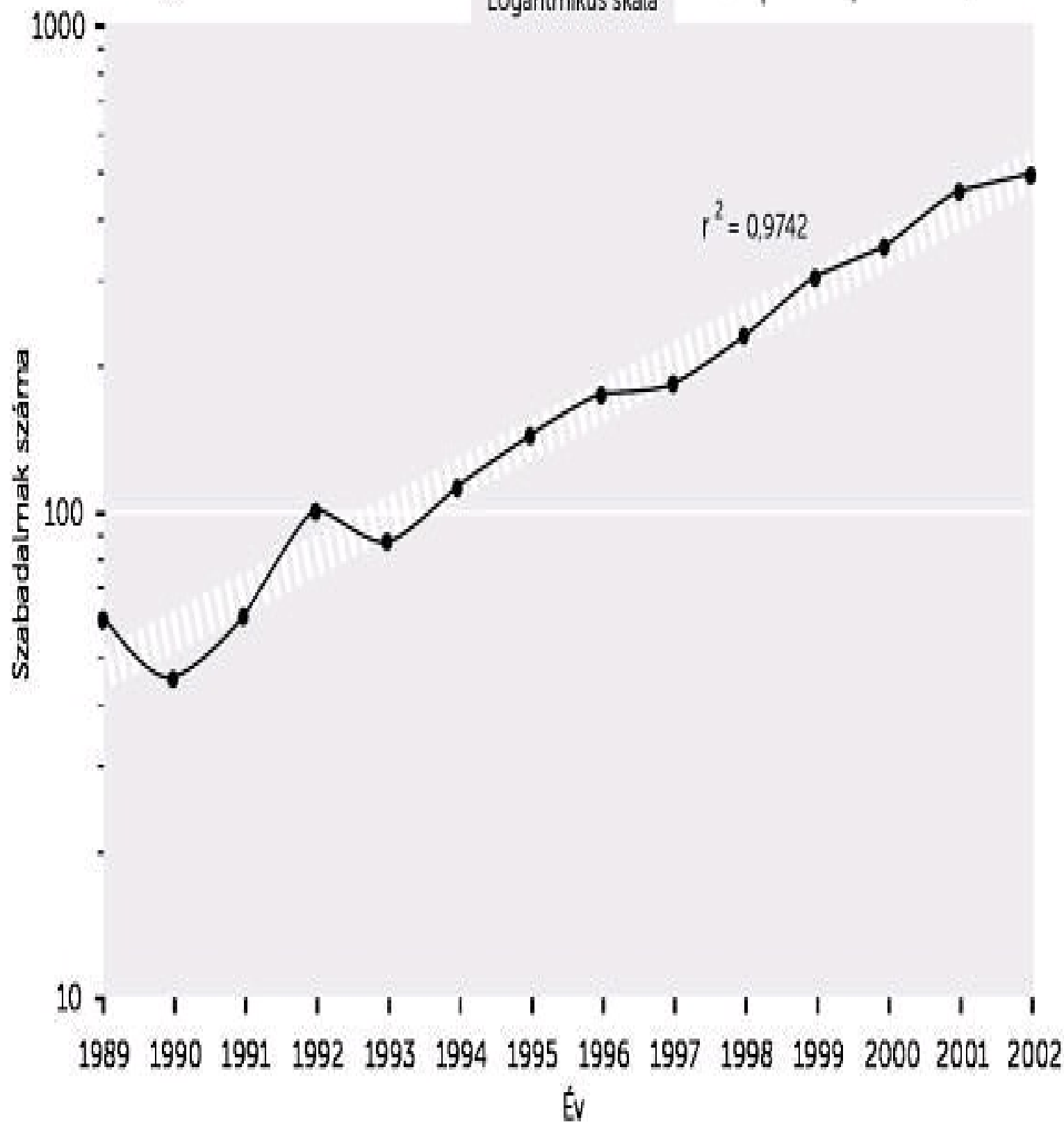
Logaritmikus skála



Nanotechnológiával kapcsolatos szabadalmak az Egyesült Államokban



Logaritmikus skála



Információ, rend és evolúció: Wolfram és Fredkin sejtautomatáinak tanulságai

Ahogy az ebben a fejezetben leírtam, az információ és az információtechnológia minden aspektusa exponenciális léptékben nő. Abbéli várakozásunktól, hogy az emberiség történelmében be fog következni egy szingularitás, elválaszthatatlan az információ mindent átható fontossága az emberi tapasztalat jövője szempontjából. A létezés minden szintjén információt látunk. Az emberi tudás és művészi kifejezés minden formája – a tudományos és mérnöki ötletek és tervek, az irodalom, a zene, a festmények, a filmek – kifejezhető digitális információként.

Az agyunk is digitálisan működik, az idegsejtjeink nem folytonos kisülései révén. Az idegsejtjeink közötti kapcsolatok leírhatók digitálisan, és az agyunk felépítését egy meglepően kicsi, digitális genetikai kód írja le.^[100]

Valójában a biológiai kód kétbites DNS-bázispárok lineáris szekvenciáin keresztül működik, melyek a fehérjéket felépítő mindössze huszonkétféle aminosav szekvenciáit kódolják. A molekulák diszkrét atomi elrendeződéseket alkotnak. A szénatom a négy szabad, molekuláris kötés létesítésére képes vegyértékével különösen alkalmas különböző háromdimenziós alakzatok létrehozására, innen a központi szerepe mind a biológiában, mind a technológiában. Az atomon belül az elektronok diszkrét energiaszinteket vesznek fel. A többi szubatomi részecske, például a proton, diszkrét számú vegyértékvarkból áll.

Noha a kvantummechanika képleteit folytonos mezőkkel és diszkrét szintekkel is ki szokták fejezni, tudjuk, hogy bináris adatokat használva bármilyen kívánt pontossággal ki lehet fejezni a folytonos szinteket.^[101] Tulajdonképpen maga a kvantummechanika is diszkrét értékeken alapul, ahogyan az a „kvantum” szóból következik is.

Stephen Wolfram fizikus-matematikus számos bizonyítékot mutatott arra, hogyan származhat egyre növekvő komplexitás egy olyan világegyetemből, amely a magját tekintve determinisztikus, algoritmikus rendszer (olyan rendszer, amely előre meghatározott kimenetekkel rendelkező, rögzített szabályokon alapul). Könyvében, az *A New Kind of Science*-ben (Egy újfajta tudomány) áttekintő elemzést ad arról, hogy a „sejtautomatának” nevezett matematikai konstrukció mögött rejlő folyamatok potenciálisan hogyan írhatják le a természeti világunk minden szintjét.^[102] (A sejtautomata egy egyszerű számítási mechanizmus, amely például egy négyzetláncban a szomszédos vagy átlós négyzetek színétől függően, egy általános transzformációs szabályt követve változtatja meg minden négyzet színét.)

E szerint a nézet szerint minden információs folyamatot ki lehet fejezni a sejtautomatákon végzett műveletekkel. Wolfram megállapítása tehát több, az információhoz és annak mindent átható mivoltához kapcsolódó kulcsfontosságú problémát érint. Wolfram posztulátuma szerint az egész világegyetem egy óriási sejtautomata számítógép. Hipotézisében a látszólag analóg jelenségek (mint a mozgás és az idő) is digitális alapra épülnek, mint ahogy a fizikai képletek is, és a fizika terén rendelkezésre álló tudásunkat egy sejtautomata egyszerű átalakulásaival is modellezhetjük.

Mások is felvetették ezt a lehetőséget. Richard Feynmanban is felmerült, amikor az információnak az anyaghoz és az energiához való viszonyán gondolkodott. Norbert Wiener 1948-as, *Cybernetics* (Kibernetika) című könyvében előre jelezte az alapvető változást, melyben a fókusz átkerül az energiáról az információra, és felvetette, hogy a világegyetem alapvető építőköve nem az energia, hanem az információ átalakulása.^[103] Konrad Zuse 1967-ben talán elsőként posztulálta, hogy a világegyetemet egy digitális számítógép konstruálja.^[104] Zuse leginkább az első működő programozható számítógép feltalálójaként ismert, amelyet 1935 és 1941 között fejlesztett ki.

A fizika információalapú elméletének egyik lelkes támogatója volt Edward Fredkin, aki az 1980-as évek elején előállt „a fizika újfajta elméletével”, amit arra az elgondolásra alapozott, hogy a világegyetem végső soron szoftverből áll. Fredkin szerint nem úgy kellene gondolnunk a világegyetemre, mint részecskékből és erőkből álló valóságra, hanem mint számítási szabályoknak megfelelően módosított adatbiteknek.

Fredkint Robert Wright idézte az 1980-as években:

„Három nagy filozófiai kérdés létezik. Mi az élet? Mi a tudat, a gondolkodás, az emlékezet meg minden? És hogy működik a világegyetem? [...] [Az] »információs nézőpont« mind a hármat felöleli... Azt akarom mondani, hogy a komplexitás legalapvetőbb szintjén egy információs folyamat működteti azt, amit mi fizikának tartunk. Egy jóval magasabb komplexitási szinten az életet, a DNS-t... tudják, a biokémiai funkciókat... egy digitális információs folyamat vezérli. Aztán megint más szinten a gondolkodási folyamataink alapvetően információs folyamatok. [...] A meggyőződéseimet alátámasztó bizonyítékokat tízezer különböző helyen megtalálom. [...] Nekem ez teljesen lehangoló. Olyan, mintha lenne egy állat, amit meg akarok találni. Megtaláltam a nyomait. Megtaláltam az ürülékét. Megtaláltam a félig megrágott táplálékát. Találtam darabokat a szőréből, és a többi.

Mindegyik nyom egyfajta állathoz illik, és az nem olyan állat, amelyet bárki is látott volna. Hol van az az állat? – kérdezik az emberek. Hát itt volt, mondom, ilyen nagy, ilyen a szőre, és a többi. És ezernyi dolgot tudok róla mondani. Nem láttam még, nem fogtam el, de tudom, hogy ott van... Annyira meggyőző, amit látok, hogy nem lehet a képzeletem terméke.”^[105]

Fredkin „digitális fizika” elmélete kapcsán Wright így ír:

„Fredkin [...] néhány számítógépprogram (köztük számos sejtautomata) érdekes jellemzőjéről beszél: nem lehet kitalálni, hová fognak vezetni. Ez az alapvető különbség a hagyományos matematikához (a differenciálszámítást is ideértve) kötődő »analitikus« megközelítés és az algoritmusokhoz kötődő »számítási« megközelítés között. Az analitikus megközelítésre fogékony rendszerek egy adott jövőbeli állapotát előre lehet jelezni anélkül, hogy tudnánk, milyen állapotokat fog felvenni a jelen és a kérdéses időpont között, ám sok sejtautomata esetében az összes köztes állapoton végig kell menni ahhoz, hogy megtudjuk, milyen lesz a végállapot: nem lehet előre tudni a jövőt, csak nézni lehet, ahogy kibontakozik... Fredkin így magyarázza ezt: »Egyes kérdésekre nem lehet gyorsabban megtudni a választ, mint ahogy a dolgok történnek.« ...Fredkin úgy véli, hogy a világegyetem szó szerint egy számítógép, amelyet egy probléma megoldására használ valaki vagy valami. Ez úgy hangzik, mint egy »van egy jó meg egy rossz hírem« típusú vicc: a jó hír az, hogy az életünknek van célja, a rossz az, hogy a cél az, hogy segítsünk valami távoli hackernek kilenc csillió tizedesjegyre megbecsülni a pít.”^[106]

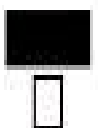
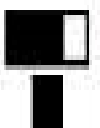
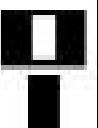
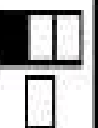
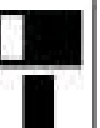
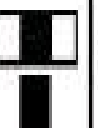
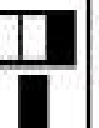
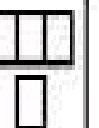
Fredkin ezek után rámutatott, hogy bár az információ tárolásához és visszanyeréséhez energiára van szükség, tetszésünk szerint csökkenthetjük az információfeldolgozás bármely adott példájához szükséges energiamennyiséget, és ennek nincs alsó határa.^[107] Ebből következően nem az anyagot és az energiát, hanem az információt tekinthetjük az alapvetőbb valóságnak.^[108] A 3. fejezetben vissza fogok térni Fredkin felismeréséhez, miszerint a számításokhoz és a kommunikációhoz szükséges energiamennyiségnek nincs alsó határa, mivel ez a felismerés kapcsolatban áll azzal, hogy a világegyetemben az intelligencia a végső hatalom.

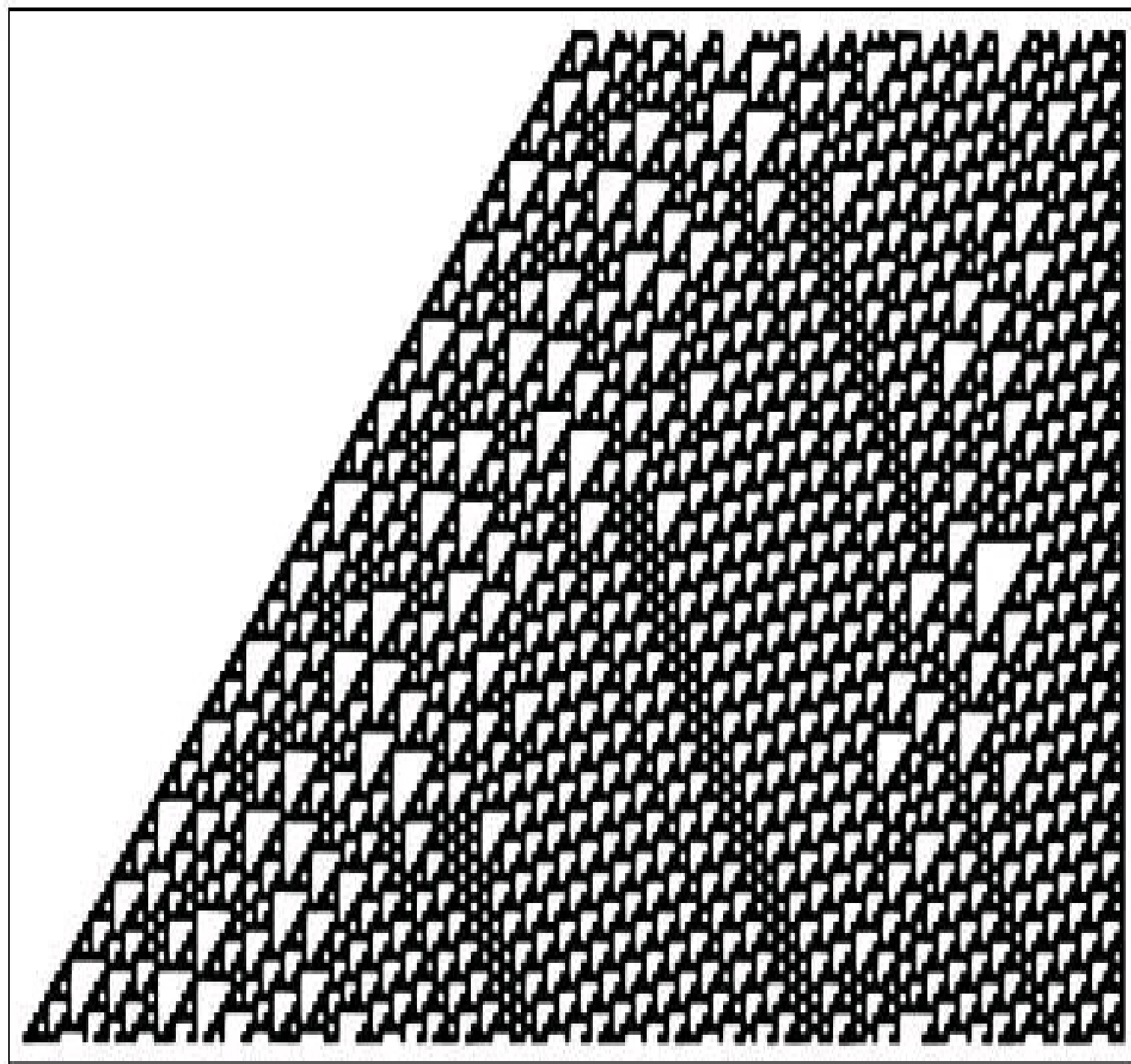
Wolfram alapvetően egyetlen egységesítő felismerésre építi az elméletét. A felfedezés, ami annyira izgatottá tette, egy egyszerű szabály, amit ő 110-es sejtautomata szabálynak nevez, és annak a viselkedése. (Vannak még egyéb érdekes automata szabályok is, de a 110-es szabály épp eléggé rávilágít a lényegre.) Wolfram elemzéseinek többsége a lehető legegyszerűbb sejtautomatákkal foglalkozik, nevezetesen azokkal, amelyek egyetlen egydimenziós, sejtekből álló vonalból, két lehetséges színből (fekete és fehér), és mindössze a cella és a két másik közvetlenül szomszédos cella állapotán alapuló szabályokból állnak. Minden egyes transzformáció során a sejtek színe csak a saját korábbi színüktől, illetve a velük közvetlenül szomszédos, bal és jobb oldali sejtek színétől függően változik. Így nyolc lehetséges bemeneti helyzet adódik (a két szín három kombinációja). Mindegyik szabálykészlet hozzárendeli a nyolc bemeneti helyzetet egy-egy kimenethez (fekete vagy fehér). Így tehát egy ilyen egydimenziós, kétszínű, egymás mellett lévő sejtek alkotta sejtautomatára 2^8 (256) féle szabálykészlet írható fel. A bal-jobb szimmetria miatt a 256 lehetséges szabálykészlet egyik fele megfelel a másik felének. A fekete-fehér felezés miatt ezt a számot is megfelezhetjük, így 64 szabálytípusunk maradt. Wolfram ezeknek az automatáknak a viselkedését kétdimenziós ábrákkal mutatja be, melyeken mindegyik sor (az y tengely mentén) a sorban lévő összes sejtre alkalmazott szabály egymást követő nemzedékeit ábrázolja.

A szabályok többsége degeneratív, azaz ismétlődő, érdektelen mintákat hoz létre, például azonos színű sejteket vagy sakktábla mintázatot. Wolfram ezeket a szabályokat első osztályú automatáknak nevezi. Egyes szabályok stabil, tetszés szerinti távolságú sávokat hoznak létre, ezeket Wolfram a második osztályba sorolja. A harmadik osztályba tartozó szabályok valamivel érdekesebbek, annyiban, hogy felismerhető alakzatok (például háromszögek) jelennek meg a mintázatban, lényegében véletlenszerű elrendezésben.

Mindazonáltal a negyedik osztályú automaták adták meg azt az „aha” élményt, amelynek nyomán Wolfram egy egész évtizedet szentelt a témának. A negyedik osztályú automaták, amelyekre a 110-es szabály a kvintesszenciális példa, meglepően összetett, nem ismétlődő mintázatot hoznak létre. Láthatunk bennük különböző szögeket bezáró egyeneseket, háromszögcsoportokat és egyéb érdekes elrendeződéseket. A kialakuló minta azonban nem szabályos, de nem is teljességgel véletlenszerű; láthatólag van valamiféle rendezettsége, ám soha nem előre jelezhető.

A 110-es szabály



A 110-es szabály által létrehozott kép egy része

Miért fontos vagy érdekes ez? Ne feledjük, hogy a lehető legegyszerűbb kezdőpontból indultunk ki: egyetlen fekete sejtből!

A folyamat egy nagyon egyszerű szabály ismétlődő alkalmazásából áll.⁽¹⁰⁹⁾ Egy ilyen ismétlődő és determinisztikus folyamattól ismétlődő és előre jelezhető viselkedést váránk. Azonban két meglepő eredményt is kapunk. Az egyik a látszólagos véletlenszerűség, ám még az önmagában hamar unalmassá váló véletlenszerűségnél is érdekesebbek a jól elkülöníthető mintázatok, és az, hogy a mintázat rendelkezik valamiféle rendezettséggel és intelligenciával. Wolfram sok ilyen képet mutat be, és szépek is akadnak közöttük.

Wolfram többször megismétli: „Amikor egy komplexnek tűnő jelenséggel találkozunk, szinte magától értetődőnek vesszük, hogy valamilyen komplex mechanizmus hozta létre. Azonban a felfedezéséből, mely szerint egyszerű programok is képesek nagy komplexitást létrehozni, egyértelműen kiderül, hogy ez nem így van.”⁽¹¹⁰⁾

Én nagyon elragadónak találom a 110-es szabály viselkedését. Emellett igen fontos az a gondolat, hogy egy teljesen determinisztikus folyamat tökéletesen előrejelezhetetlen eredményeket képes létrehozni, mivel magyarázatot ad arra, hogyan lehet a világ eredendően előrejelezhetetlen, miközben teljesen determinisztikus szabályokon alapul.⁽¹¹¹⁾ Mindazonáltal nem lep meg az elképzelés, hogy egyszerű mechanizmusok a kiindulóállapotuknál bonyolultabb eredményeket képesek létrehozni. Láttuk már ezt a jelenséget a fraktáloknál, a káosz- és komplexitáselméletben és az önszerveződő rendszerekben (mint a neurális hálózatok és a Markov-láncok), amelyek egyszerű hálózatokként indulnak, ám úgy szervezik magukat, hogy látszólag intelligens viselkedést mutassanak.

Egy másik szinten láthatjuk magában az emberi agyban, amely körülbelül harminc-száz millió byte-nyi specifikációként indul a tömörített genomban, mégis körülbelül egymilliárdszor nagyobb komplexitás lesz belőle.⁽¹¹²⁾

Az sem meglepő, hogy egy determinisztikus folyamat képes látszólag véletlenszerű eredményeket létrehozni. Vannak véletlenszám-generátoraink (például Wolfram „Mathematica” programjának „randomizálás” függvénye), amelyek determinisztikus folyamatokkal hoznak létre olyan számsorokat, melyek megfelelnek a véletlenszerűség statisztikai próbáinak. Ezek a programok a számítógépszoftverek hajnaláig követhetők vissza, például a Fortran első verzióiig. Mindazonáltal Wolfram átfogó elméleti alapot biztosít ehhez a megfigyeléséhez.

Wolfram a továbbiakban leírja, miként léteznek egyszerű számítási mechanizmusok a természet különböző szintjein, és megmutatja, hogy ezek az egyszerű, determinisztikus mechanizmusok képesek létrehozni azt a komplexitást, amit látunk és tapasztalunk. Miriád példát hoz fel, például az állatok szép pigmentmintáit, a kagylóhéjak alakját és mintázatát, vagy a turbulencia mintázatait (mint a füst viselkedése a levegőben). Okfejtésének lényege az, hogy a számítás alapvetően egyszerű és mindenütt jelenvaló. Szerinte az egyszerű számítási transzformációk ismétlődő alkalmazása a komplexitás valódi forrása a világban.

Nézetem szerint ez a kijelentés csak részben állja a meg a helyét. Egyetértek Wolframmal abban, hogy a számítás körülvesz minket, és hogy a látható mintázatok egy részét sejtautomatáknak megfelelő folyamatok hozzák létre. De a kulcskérdés, amit fel kell tenni, ez: *pontosan mennyire komplexek a negyedik osztályú automaták eredményei?*

Wolfram gyakorlatilag megkerüli a komplexitás fokainak problémáját. Egyetértek azzal, hogy egy degenerált mintázat, például egy sakktábla, nem rendelkezik komplexitással. Wolfram azt is elismeri, hogy a puszta véletlenszerűség sem képvisel komplexitást, mivel a szintizsuta véletlenszerűség is előrejelezhetővé válik csupán az előrejelezhetősége hiányában. Igaz, hogy a negyedik osztályú automaták érdekes vonásai se nem ismétlődőek, se nem szintizsuta véletlenszerűek, úgyhogy egyetértek azzal, hogy komplexebbek, mint a többi automata által létrehozott eredmények.

Ugyanakkor kétségkívül jól meghatározható korlátja van a negyedik osztályú automaták által létrehozott komplexitásnak. Wolfram könyvében az ilyen automatákról készült képek mind hasonlóak egymáshoz, és bár nem ismétlődőek, csak egy bizonyos fokig érdekesek (és intelligensek). Emellett nem fejlődnek tovább komplexebb alakzatokká és nem fejlesztenek ki új vonásokat sem. Futtathatjuk ezeket az automatákat billió vagy akár billiószor billió iteráción keresztül, a kép akkor is ugyanazon a korlátozott komplexitású szinten fog maradni. Nem fejlődnek mondjuk rovarokká, emberekké vagy Chopin-prelűdökké, sem bármi mássá, amit magasabb rendű komplexitásnak tarthatnánk, mint az ezeken a képeken látható sávok vagy egymásba fonódó háromszögek.

A komplexitás egy kontinuum. Korábban úgy definiáltam a „rendet”, mint „egy célnak megfelelő információt”.⁽¹¹³⁾ Egy teljesen előrejelezhető folyamatnak nulla a rendje. Önmagában a magas információszt sem feltétlenül jelez magas szintű rendet. Egy telefonkönyvben rengeteg információ van, de ennek az információnak a rendszintje nagyon alacsony. Egy véletlenszerű számsor gyakorlatilag szintizsuta információ (mivel nem előrejelezhető), de nincs rendje. Egy negyedik osztályú sejtautomatának valóban van bizonyos szintű rendje, és valóban fennmarad, más maradandó mintázatokhoz hasonlóan. Ám annak a mintázatnak, amit egy emberi lény képvisel, sokkal magasabb szintű a rendje és a komplexitása.

Az emberi lények megfelelnek egy nagyon nehéz célnak: életben maradnak egy veszélyes ökológiai niche-ben. Az emberi lények más mintázatok rendkívül bonyolult és összetett hierarchiáit testesítik meg. Wolfram gyakorlatilag egyenrangúnak tart minden mintázatot, amelyekben felismerhető alakzatok és előre nem jelezhető elemek vannak. Azt azonban nem mutatja meg, hogyan képes egy negyedik osztályú automata valaha is növelni a komplexitását, arról nem is beszélve, hogy olyan komplex mintázattá váljon, mint egy emberi lény.

Hiányzik egy láncszem: az, amelyik magyarázatot adna arra, hogyan jutnak el a sejtautomaták érdekes, de végső soron rutinszerű mintázatai az intelligencia magasabb szintjeit bizonyító, maradandó struktúrák komplexitásáig. Példának okáért, ezek a negyedik osztályú mintázatok nem képesek érdekes problémákat megoldani, akárhány iterációt is hajtanak végre rajtuk. Wolfram azzal vágna vissza, hogy egy 110-es szabályú automatát „univerzális számítógépként” lehet használni.^[114] Ám egy univerzális számítógép önmagában, anélkül, amit én „szoftvernek” neveznék, nem képes intelligens problémákat megoldani. Éppen az univerzális számítógépen futó szoftver komplexitása a kérdés.

Érdemes szem előtt tartani, hogy a negyedik osztályú mintázatok a lehető legegyszerűbb sejtautomatákból származnak (egydimenziós, kétszínű, két szomszéddal rendelkező szabályokból). Mi történik, ha növeljük a dimenzionalitást – például több szint használunk, vagy folyamatos funkciókra általánosítjuk a diszkrét sejtautomatákat? Wolfram alaposan megvizsgálja ezt a kérdést.

A komplexebb automaták által létrehozott eredmények lényegében ugyanazok, mint a nagyon egyszerűeké. Ugyanolyan érdekes, de végső soron korlátozott mintázatokot kapunk. Wolfram azt az érdekfeszítő megállapítást teszi, hogy nem kell komplexebb szabályokat alkalmaznunk ahhoz, hogy komplex végeredményt kapjunk. Én viszont megfordítanám az állítását: sem komplexebb szabályokkal, sem további iterációkkal nem tudjuk növelni a végeredmény komplexitását. A sejtautomatáktól csak ennyit várhatunk.

Kifejleszthető a mesterséges intelligencia egyszerű szabályok alapján?

Tehát hogyan jutunk el ezektől az érdekes, de korlátozott mintázatoktól a rovarok, az emberek vagy a Chopin-prelűdök mintázataiig? Az egyik fogalom, amin el kell gondolkodnunk, a konfliktus – azaz az evolúció. Ha Wolfram egyszerű sejtautomatáját kiegészítjük egy másik egyszerű fogalommal – egy evolúciós algoritmussal –, akkor sokkal izgalmasabb és intelligensebb eredményeket fogunk kapni. Wolfram azt mondaná, hogy a negyedik osztályú automaták és az evolúciós algoritmusok „számítási szempontból ekvivalensek”. Ám ez csak a „hardver” szintjén igaz. A szoftver szintjén a létrehozott mintázatok rendje egyértelműen más, és más nagyságrendű komplexitást és hasznosságot képvisel.

Egy evolúciós algoritmus kialakulhat egy probléma véletlenszerűen létrehozott potenciális megoldásaiból, melyek egy digitális genetikai kód formájában vannak kódolva. Ezután a megoldásokat versenyeztetjük egymással egy szimulált evolúciós küzdelemben. A jobb megoldások fennmaradnak és egy szimulált szexuális szaporodási aktusban szaporodnak, melyből leszármazott megoldások keletkeznek, szüleiktől örököelve a genetikai kódjukat (kódolt megoldásaikat). Bevezethetünk valamilyen szintű genetikai mutációt is. Ennek a folyamatnak számos magas szintű paraméterét, például a mutáció sebességét, az utódok létrejöttének sebességét, és a többi – nagyon helyesen – „Isten-paramétereknek” nevezik, és az evolúciós algoritmust megtervező mérnök feladata az, hogy ésszerű, optimális értékeket adjon nekik. A folyamatot több ezer nemzedéknyi szimulált evolúción át futtatjuk, és a végén valószínűleg sokkal magasabb rendű megoldásokat találunk, mint amilyenek a kiindulók voltak.

Ezeknek az evolúciós algoritmusoknak (néha genetikai algoritmusoknak is nevezik őket) az eredményei elegáns, szép és okos megoldásokat adhatnak komplex problémákra. Felhasználták már őket például művészi minták és tervek előállítására, mesterséges életformák tervezésére, és sok más gyakorlati alkalmazásra, például sugárhajtóművek konstruálására. A genetikai algoritmusok az egyik megközelítést jelentik a „szűk” mesterséges intelligenciához – azaz az olyan rendszerek létrehozásához, melyek képesek ellátni bizonyos feladatokat, melyekhez korábban az emberi intelligenciát kellett használni.

Ám valami még mindig hiányzik. Noha a genetikai algoritmusok hasznos eszközök konkrét problémák megoldásában, soha meg sem közelítették az „erős MI-t” – azt a felfogóképességet, ami akár csak hasonlítana az emberi intelligencia széles körű, mély és kifinomult vonásaira, különös tekintettel annak mintafelismerő képességére, illetve nyelvi készségére. Az lenne a probléma, hogy nem futtatjuk elég sokáig a genetikai algoritmusokat? Végül is az emberi evolúció folyamata több milliárd éven keresztül zajlott. Talán nem lehet megismételni ezt a folyamatot néhány napi vagy heti számítógépes szimulációval. Ez azért nem járható út, mert a konvencionális genetikai algoritmusok elérnek egy aszimptotát a teljesítményszintjükben, tehát nem segít, ha tovább futtatjuk őket.

A harmadik szint (a sejtautomaták képességén túl, hogy látszólagos véletlenszerűséget állítsanak

elő, illetve a genetikai algoritmusok képességén túl, hogy fókuszált, intelligens megoldásokat találjanak) az evolúció több szinten történő lejátszása.

A konvencionális genetikai algoritmusok csak egy szűk probléma keretein belül és egyszerű evolúciós eszközökkel fejlődnek. Magának a genetikai kódnak és az evolúció szabályainak is fejlődniük kell. A természet sem maradt meg az egy kromoszómánál. A természetes evolúciós folyamatban több szinten van jelen a közvetettség. És szükség van egy komplex környezetre is, amelyben az evolúció lezajlik.

Mindazonáltal az erős MI megépítéséhez lehetőségünk lesz rövidre zárni ezt a folyamatot azzal, hogy visszafejtsük az emberi agyat (mely projekt már jó úton halad), s ezáltal kihasználjuk a már lezajlott evolúciós folyamat előnyeit. Úgy fogunk evolúciós algoritmusokat alkalmazni ezeken a megoldásokon belül, ahogyan az emberi agy. Például a magzati agy, legalábbis régióiban, kezdetben – a genomban meghatározott keretek között – „véletlenszerűen huzalozott”. A legújabb kutatások kimutatták, hogy a tanulással kapcsolatos területek több változáson mennek át a születés után, a tapasztalatok érzékszervi feldolgozásával kapcsolatos struktúrák viszont kevesebben.^[115]

Wolfram helyesen állapítja meg, hogy bizonyos számítási folyamatok (valójában a többségük) nem előrejelezhetőek. Más szóval, nem tudjuk megjósolni a jövőbeli állapotokat anélkül, hogy le ne futtatnánk a teljes folyamatot. Egyetértek vele abban, hogy csak akkor tudhatjuk a választ előre, ha valahogyan fel tudjuk gyorsítani a folyamatot. Tekintettel arra, hogy a világegyetem a legnagyobb sebességgel fut, amire képes, általában nincs mód a folyamat rövidre zárására. Ugyanakkor rendelkezünk a már lezajlott több milliárd évnyi evolúció előnyével, ami a természeti világban meglévő komplexitás nagymértékben megnövekedett rendjét létrehozta. Most úgy támaszkodhatunk rá, hogy fejlett eszközeinkkel visszafejtsük a biológiai evolúció termékeit (s ami a legfontosabb, az emberi agyat).

Igen, igaz, hogy egyes természeti jelenségek, melyek bizonyos szinten komplexnek tűnnek, pusztán olyan egyszerű számítási mechanizmusok eredményei, melyek lényegében nem mások, mint működő sejtautomaták. Jó példa erre az *Oliva porphyria* héján található érdekes háromszögmintázat (amit oly sokszor idéz Wolfram), vagy a hópelyhek bonyolult, sokféle alakja. Nem hiszem, hogy ez új megfigyelés lenne abból a szempontból, hogy a hópelyhek alakjáról mindig is úgy tartottuk: egy egyszerű molekuláris számításhoz hasonló folyamat révén jön létre. Ugyanakkor Wolfram valóban meggyőző elméleti alapot kínál ezeknek a folyamatoknak és a belőlük származó mintázatoknak a leírására. Ám a biológia több, mint negyedik osztályú mintázatok halmaza.

Wolfram egy másik fontos megállapítása az, hogy a számítást következetesen egyszerű és mindenütt jelen lévő jelenségnek tekinti. Természetesen több mint egy évszázada tudjuk, hogy a számítás inherensen egyszerű: bármilyen lehetséges szintű komplexitást felépíthetünk az információ lehető legegyszerűbb manipulációjával.

Például Charles Babbage XVIII. század végi mechanikus számítógépe (amely sohasem készült el) csak néhány utasítással rendelkezett, mégis ugyanazokat a műveleteket lett volna hivatott elvégezni, mint a modern számítógépek (nyilván a maga memóriakapacitásával és sebességével). Babbage találmányának a komplexitása a terv részleteiből fakadt, melyeket aztán Babbage a rendelkezésére álló technológiával nem is tudott megvalósítani.

A Turing-gép, Alan Turing univerzális számítógépének az 1950-es években megalkotott modellje mindössze hét alaputasítással rendelkezik, mégis elvégezhető vele bármilyen lehetséges számítás.^[116] Az „univerzális Turing-gép” létezése – amely képes szimulálni a szalagos memóriájában leírt bármilyen lehetséges elméleti Turing-gépet – ismét csak azt példázza, mennyire egyetemes és egyszerű fogalom az információ.^[117] A *The Age of Intelligent Machines*-ben (Az intelligens gépek kora) bemutattam, hogyan lehet minden számítógépet felépíteni kizárólag egy nagyon egyszerű alkatrész, az úgynevezett „NOR” kapu használatával.^[118] Ez nem pontosan ugyanaz, mint az univerzális Turing-gép, de megmutatja, hogy több ilyen nagyon egyszerű (a 110-es szabálynál is egyszerűbb) eszköz összekapcsolásával bármilyen számítást el lehet végezni, ha megvan hozzá a megfelelő szoftver (ami ebben az esetben a NOR kapuk összekapcsolásának a leírását jelenti).^[119]

Noha további fogalmakra van még szükségünk ahhoz, hogy leírjunk egy a problémákra intelligens megoldásokat adó evolúciós folyamatot, Wolfram bizonyítása a számítás egyszerűsége és mindenütt jelenvalósága mellett fontos hozzájárulás ahhoz, hogy megértsük, milyen alapvető fontosságú az információ a világban.

MOLLY 2004: *Azt mondd, a gépek egyre gyorsuló ütemben fejlődnek. Mi van az emberekkel?*

RAY: *Úgy érted, a biológiai emberekkel?*

MOLLY 2004: *Igen.*

CHARLES DARWIN: *Feltehetőleg a biológiai evolúció is folytatódik, nem?*

RAY: *Nos, a biológiai ezen a szinten olyan lassan fejlődik, hogy szinte nem is számít. Említettem már, hogy az evolúció közvetett módon működik. Tudjuk, hogy a régi paradigmák, mint a biológiai evolúció, tovább fejlődnek a maguk régi sebességével, de elhomályosítják őket az új paradigmák. Az olyan komplex állatok esetében, mint az ember, a biológiai evolúciónak több tízezer év kell, hogy észrevehető, de még így is nagyon apró változásokat hozzon létre. Ennyi időt ölel fel az emberi kulturális és technológiai evolúció teljes története. Most mégis abban a helyzetben vagyunk, hogy mindössze néhány évtized alatt túlléphetünk a biológiai evolúció törékeny és lassú teremtményein. A jelenlegi haladás léptéke ezerszer-egymilliószor nagyobb, mint a biológiai evolúcióé.*

NED LUDD: *És ha valaki nem kér ebből az egészből?*

RAY: *Nem hiszem, hogy lenne ilyen. Mindig vannak olyanok, akik hamar, és olyanok, akik későn kezdik el használni az új technológiákat. A technológiában vagy bármilyen evolúciós változásban mindig van egy élcsapat, meg vannak a lemaradók. Még ma is akadnak emberek, akik ekével szántanak, de ez nem lassította le a mobiltelefonok, a telekommunikáció, az internet, a biotechnológia és a többi elterjedését. A lemaradók végül úgyis felzárkóznak. Ázsiában léteznek olyan közösségek, amelyek a földművelő gazdálkodásból egyenesen az információalapú gazdaságba ugrottak át, kihagyva az iparosodás teljes folyamatát.* ^[120]

NED: *Lehet, hogy ez így van, de a digitális szakadék szélesedik.*

RAY: *Tudom, hogy állandóan ezt hajtogatják, de hogy lehetne ez igaz? Az emberek száma nagyon lassan növekszik. A digitálisan összekapcsolódott emberek száma gyorsan nő, akárhogy is mérjük. A világ népességének egyre nagyobb része kapcsolódik be az elektronikus kommunikációba, ugorja át a primitív vezetékes telefonhálózatot, és csatlakozik vezeték nélkül az internetre... Tehát a digitális szakadék nemhogy nem szélesedik, de igen gyorsan szűkül.*

MOLLY 2004: *Én akkor is úgy érzem, hogy a kinek van, kinek nincs kérdés nem kap elég figyelmet. Többet kellene tennünk ebben az ügyben!*

RAY: *Valóban, de a gyorsuló megtérülések törvényének mindent felülbíráló, személytelen erői akkor is a helyes irányba tartanak. Gondoljunk csak arra, hogy egy adott terület technológiája eleinte mindig megfizethetetlenül drága és hibás! Aztán egyszerűen csak drága lesz, és valamivel jobban működik. A következő szakaszban a termék olcsóvá válik és nagyon jól működik. Végül aztán gyakorlatilag ingyenessé válik, és remekül működik. Nemrég, ha egy filmben valakinél mobiltelefont láttunk, akkor tudtuk, hogy az illető a hatalmi elithez tartozik, mert csak a gazdagok engedhették meg maguknak a mobiltelefonálást. Vagy húsba vágóbb példa az AIDS ellen kifejlesztett gyógyszereké. Eleinte nem voltak túl hatékonyak, és évente több mint tízezer dollárba kerültek egy betegnek. Most már sokkal jobbak, és a szegényebb országokban fejenként mindössze néhány száz dollárba kerülnek évente.* ^[121] *Sajnos az AIDS gyógyítása még nem tart a „remekül működik és szinte ingyenes” szakaszban. A világ éppen csak elkezdett valamivel hatékonyabban fellépni az AIDS ellen, de tragikus, hogy eddig nem tettünk többet. Több millió élet veszett el emiatt, a legtöbb Afrikában. Ám a gyorsuló megtérülések törvényének hatása akkor is a megfelelő irányban hat. És az élcsapat meg a lemaradók közötti időérés is szűkül. Jelenleg egy évtizedre becsülöm a lemaradást. Egy évtized múlva pedig fél évtized lesz csupán.*

A szingularitás mint gazdasági imperatívusz

„Az okos ember alkalmazkodik a világhoz, a buta makacsul a világot próbálja magához hajlítani. Ennél fogva a haladás a butáktól függ.”

*(George Bernard Shaw,
„Maxims for Revolutionists”, Man and Superman, 1903
[Ember és felsőbbrendű ember, „Irányelvek forradalmároknak”])*

„Minden haladásnak az a minden élőlényben meglévő, egyetemes és veleszületett vágy az alapja, hogy jobban éljünk, mint ahogy a jövedelmünk alapján tehetnénk.”

(Samuel Butler, Notebooks [Feljegyzések], 1912)

„Ha ma el kellene indulnom a nyugati partra, hogy elindítsak egy új vállalkozást, akkor a biotechnológia és a nanotechnológia felé fordulnék.”

(Jeff Bezos, az Amazon.com alapítója és igazgatója)

Szerezzen nyolcvanbillió dollárt – záros határidőn belül!

Ha elolvassák és megértik ezt a részt, nyolcvanbillió dollárt fognak keresni. A részleteket lásd lentebb. (Igen, egy író bármit megtenne, hogy fenntartsa az olvasói érdeklődését, de ezúttal komolyan beszélek. Mindenesetre amíg rá nem térek a magyarázatra, olvassák el figyelmesen a bekezdés első mondatát!)

A gyorsuló megtérülések törvénye alapvetően közgazdasági elmélet. A kortárs közgazdasági elméletek és gyakorlatok idejétmúlt modelleken alapulnak, amelyek az energiaköltségeket, a nyersanyagárakat, a gyártásra fordított befektetéseket hangsúlyozzák kulcsfontosságú hajtóerőkként, és nem veszik figyelembe a számítási kapacitást, a memóriát, a sávszélességet, a technológia méretét, a szellemi tulajdont, a tudást és a többi, egyre fontosabb alkotóelemet mint a gazdasági hajtóerőit.

A kompetitív piac gazdasági imperatívusza a technológiát előre lendítő és a gyorsuló megtérülések törvényét üzemanyaggal ellátó alapvető erő. Ugyanakkor a gyorsuló megtérülések törvénye átalakítja a gazdasági viszonyokat. A gazdasági imperatívusz a biológiai evolúció túlélésének a megfelelője. Miriádnyi apró előrelépés eredményeként, melyek mindegyikének megvan a maga gazdasági igazolása, egyre intelligensebb és kisebb gépek felé haladunk. A feladatukat pontosabban ellátó gépek értékesebbek, ezért gyártják őket. Több tízezer projekt létezik, amelyek számtalan módon lendítik előre a gyorsuló megtérülések törvényének különböző aspektusait.

A rövid távú üzleti ciklusok ellenére hihetetlen mértékben megnőtt a „high-tech” és különösen a szoftver támogatottsága az üzleti közösségben. Amikor 1974-ben elindítottam optikai karakterfelismeréssel (OCR) és beszédszintetizálással foglalkozó céget (Kurzweil Computer Products), az Egyesült Államokban a high-tech kockázati befektetések alig érték el a harmincmillió dollárt (1974-es árfolyamon). Ez a szám még a közelmúltbeli high-tech recesszió (2000–2003) idején is közel százszor nagyobb volt.^[122] Ezt a fejlődést legfeljebb úgy lehetne megállítani, ha eltörölnénk a kapitalizmust és a gazdasági versenyt minden nyomát.

Fontos rámutatni, hogy exponenciálisan, mindazonáltal fokozatosan haladunk az „új”, tudásalapú gazdaság felé.^[123] Amikor az úgynevezett új gazdaság nem alakította át egyik napról a másikra az üzleti modelleket, sok megfigyelő azonnal elvetette a gondolatot mint eredendően hibásat. El kell telnie még két évtizednek, mielőtt a tudás határozná meg a gazdaságot, de az átalakulás mélyreható lesz, amikor

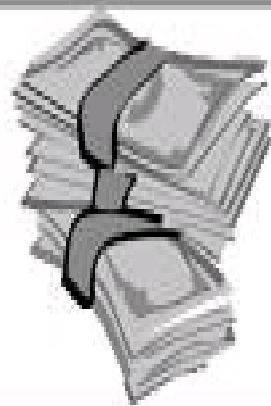
bekövetkezik.

Ugyanezt a jelenséget láttuk az internet és a telekommunikáció konjunktúra-dekonjunktúra ciklusaiban. A konjunktúrákat az a helyes meglátás hajtotta, hogy az internet és az elosztott elektronikus kommunikáció alapvető átalakulást jelent. Ám amikor ezek az átalakulások nem következtek be egy adott – irreális – időhatáron belül, több mint kétbillió dollárnyi piaci tőke tűnt el az ipárból. Ahogy arra a későbbiekben rámutatok, ezeknek a technológiáknak a valóságos elterjedése egyenletesen, bármiféle konjunktúrára vagy dekonjunktúrára utaló jel nélkül zajlott le.

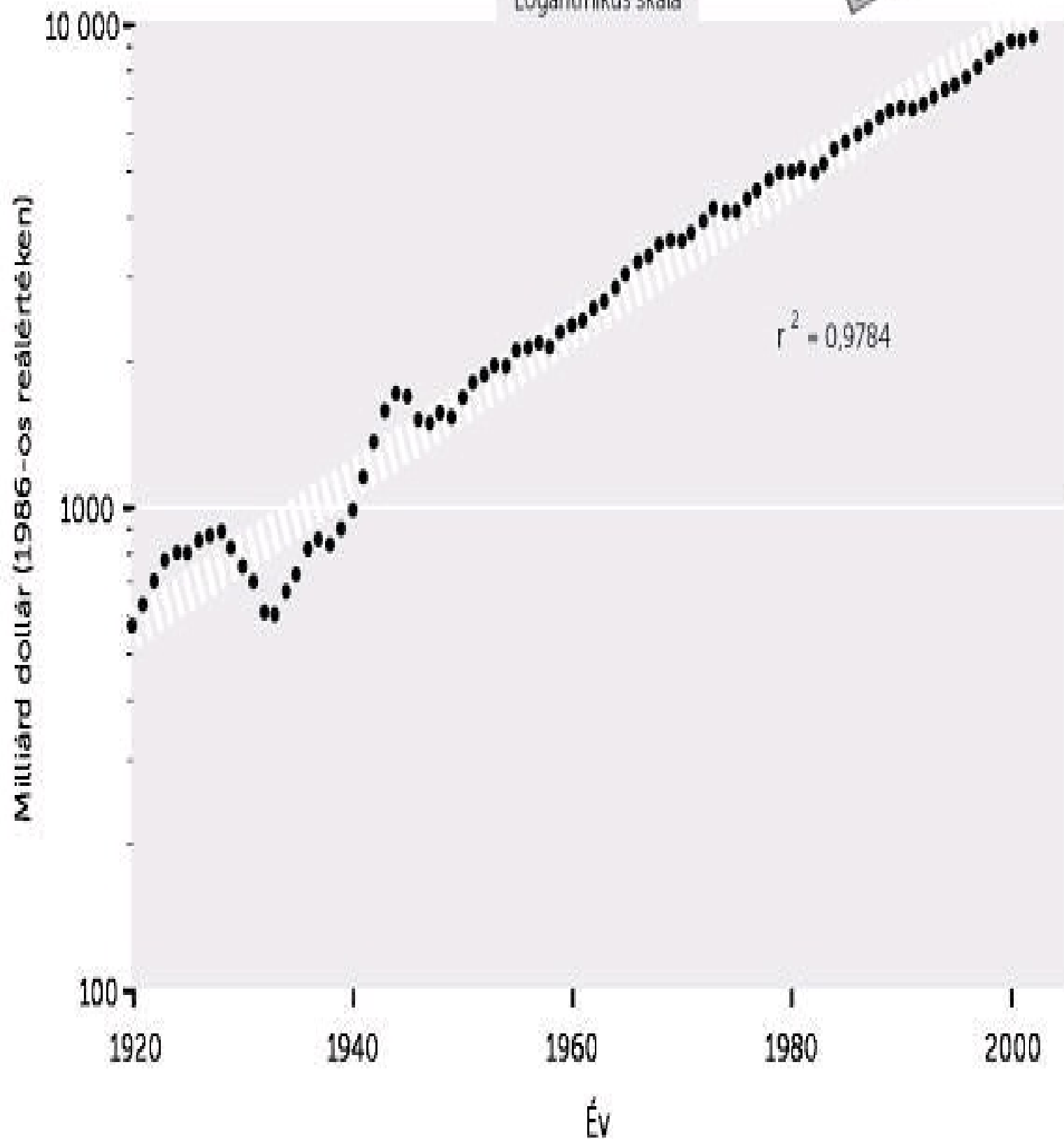
Gyakorlatilag – az összes, a közgazdasági egyetemeken tanított és a FED⁽⁵⁾ által a monetáris politika kidolgozása során, a kormányügynökségek által a gazdaságpolitika kialakítása során, és a legkülönbözőbb gazdasági előrejelzők által – alkalmazott gazdasági modell alapvetően hibásan tekint a hosszú távú trendekre. Ennek az az oka, hogy az említettek a történelem „intuitív lineáris” felfogásán alapulnak (azon a feltételezésen, hogy a változás sebessége egyenletes marad), nem pedig a történelmileg megalapozott exponenciális felfogásán. Ezek a lineáris modellek ugyanazért működnek egy ideig, amiért a legtöbb ember alapvetően az intuitív lineáris nézetet fogadja el: az exponenciális trendek lineárisnak tűnnek, amikor rövid időn át figyelik és tapasztalják meg őket, különösen a korai szakaszban, amikor nem sok minden történik. Ám amint elérjük a „görbe térdét” és bekövetkezik az exponenciális robbanás, a lineáris modell összeomlik.

Miközben ezt a könyvet írom, az Egyesült Államokban folyik a vita a társadalombiztosítási program átalakításáról, olyan kivetítések alapján, melyek 2042-ig tekintenek előre – nagyjából tehát arra az időszakra, amelyikre a szingularitás beköszöntét teszem (lásd a következő fejezetet). Ez a gazdaságpolitikai felülvizsgálat szokatlan abból a szempontból, hogy nagyon hosszú időszakkal számol. Az előrejelzések a várható élettartam növekedésének és a gazdasági növekedésnek eléggé irreális, lineáris modelljein alapulnak. Egyfelől az élettartam növekedése nagymértékben meg fogja haladni a kormányzat szerény várakozásait. Másfelől az emberek nem akarnak majd hatvanöt évesen nyugdíjba menni, amikor harmincéves állapotban lévő testük és agyuk lesz. S ami a legfontosabb, a „GNR”-technológiákból származó gazdasági növekedés (lásd az 5. fejezetet) nagymértékben meg fogja haladni az évi 1,7 százalékos becsült értéket (ami még az elmúlt tizenöt évben tapasztalt növekedésnek is csak a fele).

Valós bruttó hazai össztermék

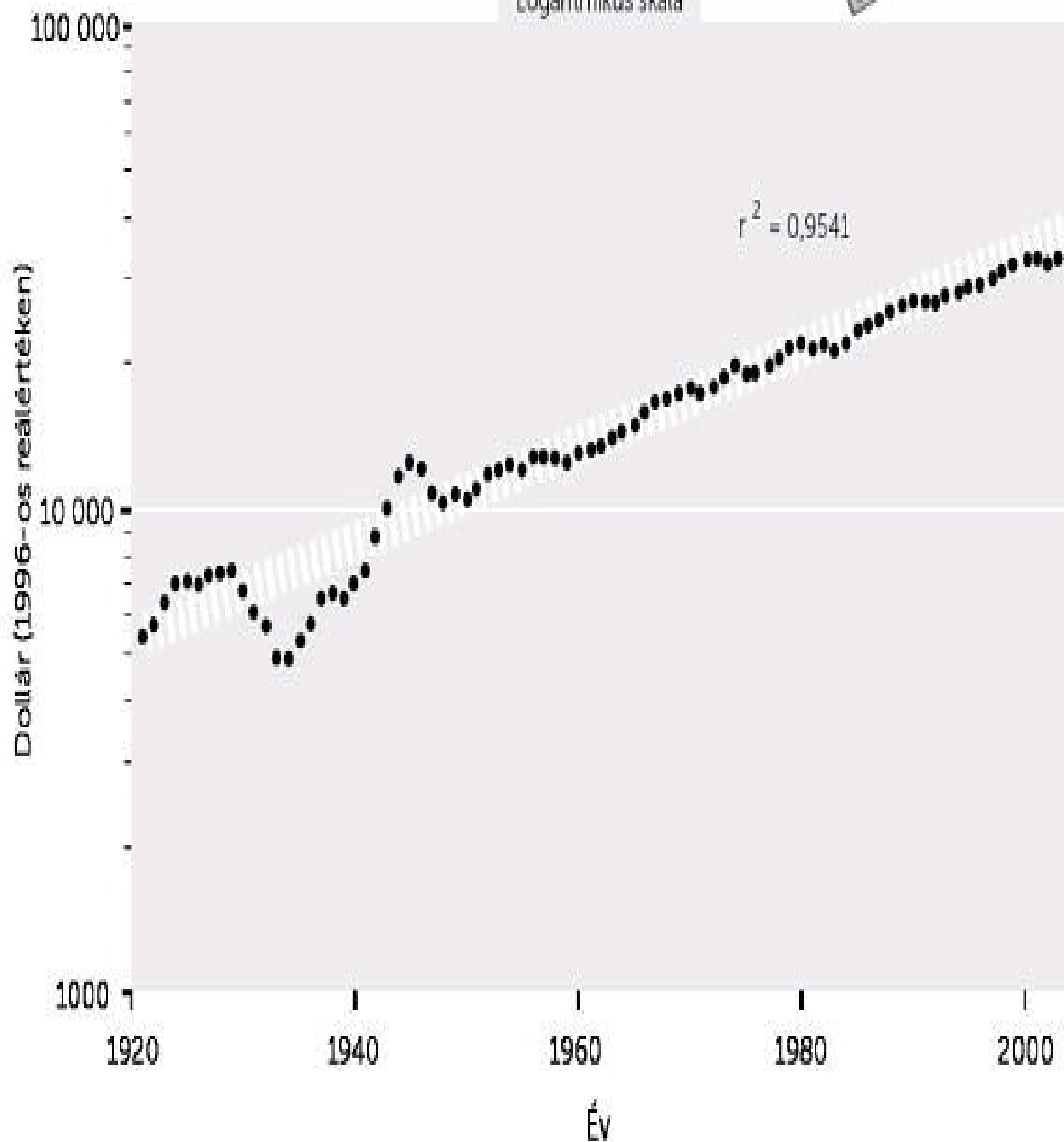
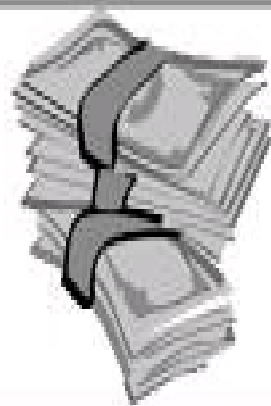


Logaritmusikus skála



Egy főre jutó GDP

Logaritmus skála



A termelékenység növekedése mögötti exponenciális trendek éppen csak beléptek a kirobbanó szakaszba. Az Egyesült Államok bruttó hazai összterméke mindeddig exponenciálisan növekedett, főleg a technológiai fejlesztéseknek köszönhető termelékenység-javulás miatt, ahogyan az a felső ábrán is látható. [\[124\]](#)

Egyes kritikusok a népességnövekedésnek tulajdonítják a GDP növekedését, de ugyanezt a trendet láthatjuk az adatokat egy főre vetítve is (lásd az alsó ábrát). [\[125\]](#)

Figyeljük meg, hogy a gazdaság exponenciális növekedése sokkal erősebb, mint az időszakos recessziók! A recessziók, ideértve a válságokat is, csak ideiglenes eltérést jelentenek a fő trendtől. A növekedés meghatározó mintázatában még a nagy gazdasági válság is csupán egy kis botlás. A gazdaság minden esetben visszatért arra a szintre, amin akkor lett volna, ha a recesszió vagy a válság meg sem történt volna.

A világgazdaság folyamatosan gyorsul. A Világbank 2004 végén közzétett jelentése szerint az adott év a világszinten 4 százalékos gazdasági növekedéssel gazdagabb volt, mint bármelyik a történelemben. [\[126\]](#) Ráadásul a fejlődő országokban volt a legnagyobb a növekedés: több mint 6 százalék, de ha nem számítjuk Indiát és Kínát, akkor is meghaladta az 5 százalékot. A kelet-ázsiai és a csendes-óceáni térségben a mélyszegénységben élők száma az 1990-es 470 millió főről 2001-re 270 millióra csökkent, és a Világbank előrejelzése szerint 2015-re 20 millió alá csökken. Más régiók hasonló, bár kevésbé drámai gazdasági növekedést mutatnak.

A termelékenység (az egy munkásra vetített gazdasági output) szintén exponenciálisan növekedett. Ezek a statisztikák valójában nagymértékben alulbecsültek, ugyanis nem tükrözik teljes mértékben a termékek és szolgáltatások minőségében és jellemzőiben bekövetkezett fontos fejlesztéseket. Nem lehet azt mondani, hogy egy autó az egy autó, és kész – fontos fejlesztések történtek a biztonság, a megbízhatóság és az egyéb jellemzők terén. Az is biztos, hogy ezer dollár értékű számítókapacitás ma sokkal nagyobb teljesítményt jelent, mint tíz évvel ezelőtt (körülbelül ezerszer nagyobb). És sorolhatnánk még a példákat. A gyógyszerek egyre hatékonyabbak, mert ma már úgy tervezik őket, hogy pontosan a kívánt módosításokat hajtsák végre a betegségek és az öregedés folyamatai mögött rejlő metabolikus útvonalakon, minimális mellékhatásokkal. (De figyeljük meg, hogy a forgalomban lévő gyógyszerek nagy része még mindig a régi paradigmát tükrözi! Lásd: 5. fejezet).

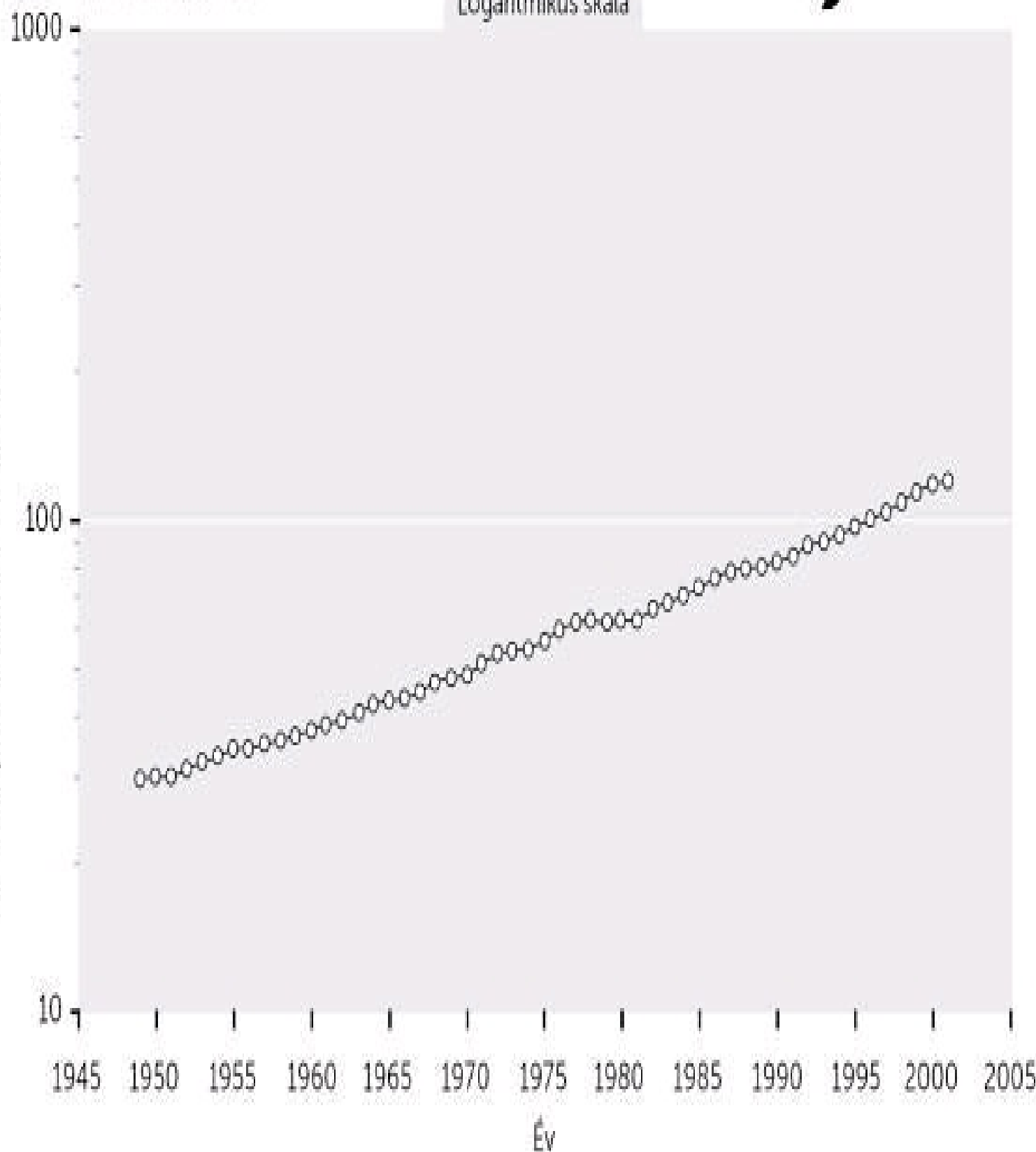
A magánszektor ipari termelése

Kimenet per óra

Logaritmikus skála



Kimenet per óra dollárban (1996-os reálértéken)



A termelékenység mérésére szolgáló statisztikai módszerek hajlamosak figyelmen kívül hagyni a fejlődést, azt állítva, hogy még mindig csak egy dollárnyi terméket és szolgáltatást kapunk egy dollárért, annak ellenére, hogy sokkal többet kapunk azért az egy dollárért. (A számítógépek ennek a jelenségnek a szélsőséges példái, de a jelenség mindenhol megfigyelhető.) Pete Klenow, a Chicagói Egyetem professzora és Mark Bils, a Rochester Egyetem professzora becslése szerint az elmúlt húsz évben a minőségi fejlődés miatt a létező javak reálértéke évente 1,5 százalékkal nőtt.^[127] Ez a becslés még mindig nem számol az új termékek és termékkategóriák megjelenésével (például mobiltelefonok, zsebszámítógépek, letöltött zenék és szoftverek). Nem számol magának a webnek a kibontakozó értékével. Mi az értéke az olyan ingyenesen hozzáférhető forrásoknak, mint az online enciklopédiák és keresőmotorok, amelyek gyakorlatilag az emberi tudás kapuivá váltak?

Az infláció nyomonkövetéséért felelős Munkaügyi Statisztikai Iroda által használt modell mindössze évi 0,5 százalékos minőségi növekedéssel számol.^[128] Ha Klenow és Bils konzervatív becslését vesszük alapul, az iroda szisztematikusan alulbecsüli a minőségi fejlődést, s ennek eredményeként évente legalább 1 százalékkal túlbecsüli az inflációt. És még mindig nincs szó az új termékkategóriákról!

A termelékenységi statisztikai módszerek ezen gyengéi ellenére a termelékenység növekedése mostanában éri el az exponenciális görbe meredek szakaszát. A munka termelékenysége 1994-ig évente 1,6 százalékkal nőtt, majd évente 2,4 százalékkal, és jelenleg még gyorsabban növekszik. A termelés produktivitása óránkénti termelés tekintetében 1995 és 1999 között évi 4,4 százalékkal nőtt, a tartós fogyasztási cikkek gyártása esetében pedig évente 6,5 százalékkal. 2004 első negyedében a naptárhatást figyelembe véve a termelékenység változásának éves aránya 4,6 százalék volt az üzleti szektorban és 5,9 százalék a tartós fogyasztási cikkek gyártásában.^[129]

Az elmúlt fél évszázadban egyenletes exponenciális növekedés figyelhető meg az egyórányi munkával megtermelt érték tekintetében (lásd az iménti ábrát). Ez a trend sem veszi figyelembe a dollár rendkívüli módon megnőtt vásárlóerejét az információtechnológia területén (aminek a teljes ár–teljesítmény-aránya évente körülbelül a kétszeresére javult).^[130]

A defláció... rossz?

„1846-ban egyetlen géppel varrott ruha sem volt az országban; abban az évben nyújtották be a varrógép szabadalmát. Jelenleg ezrek viselnek acélujjak által összeöltött ruhákat, és a gépek készítette öltések aprólékossága felér egy kasmíri lány munkájával.”
(Scientific American, 1853)

Miközben ezt a könyvet írom, a politikai bal és jobb oldalon egyaránt sok mérvadó közgazdász aggódik a defláció miatt. Első ránézésre azt hinnénk, hogy az csak jó, ha a pénzünk többet ér. A közgazdászok amiatt aggódnak, hogy ha a vásárlók kevesebb pénzből meg tudják venni azt, amire szükségük van és amire vágnak, akkor a gazdaság zsugorodni fog (dollárban kifejezve). Ez a megközelítés azonban nem veszi számításba az emberi vásárlók szükségleteinek és vágyainak a kielégíthetetlenségét. A félvezetőipar bevételei, amelyek évente 40-50 százalékos deflációt „szenvedtek el”, mindezek ellenére évente 17 százalékkal nőttek az elmúlt fél évszázadban.^[131] Mivel a gazdaság valójában a robbanásszerű növekedés állapotában van, a defláció elméleti hatásainak nem kellene aggodalomra okot adniuk.

Az 1990-es években és a 2000-es évek elején láthattuk a történelem legnagyobb deflációs erőit, ami megmagyarázza, miért látunk most jelentős inflációt. Igen, igaz, hogy történelmi szempontból az

alacsony munkanélküliség, a magas kintlévőségek, a gazdasági növekedés és a többi hasonló tényező inflációgerjesztő hatású, ám ezeket a tényezőket kiegyenlítik az információalapú technológiák: a számítás, a memória, a kommunikáció, a biotechnológia, a miniaturizálás, valamint a technikai fejlődés általános sebessége ár–teljesítmény-arányának exponenciális trendje. Ezek a technológiák nagy hatással vannak minden iparágra. Mindemellett a web és a többi új kommunikációs technológia miatt radikálisan lerövidülnek az értékesítési láncok, és egyre hatékonyabbá válik a cégek működtetése és adminisztrációja.

Mivel az információtechnológia egyre nagyobb hatással van az összes gazdasági szektorra, az IT-ipar rendkívüli deflációja is egyre nagyobb hatást gyakorol azokra. A nagy gazdasági válság idején, az 1930-as években a defláció a vásárlói bizalom és a pénzkészlet összeomlásának a következménye volt. A mai defláció teljesen más jelenség, a sebesen növekvő termelékenység és az információ összes formájának egyre szélesebb körű elérhetősége okozza.

A fejezetben bemutatott trenddiagramok mindegyike óriási deflációt jelez. Az egyre terjedő hatékonyságnövekedésre számos példát lehet felhozni. A BP Amoco olajkutatási költségei 2000-ben alig egy dollárra rúgtak hordónként, míg 1991-ben még közel tíz dollárra. Egy internetes átutalás feldolgozása egy centbe kerül a bankoknak, egy banki alkalmazott közbeiktatásával több mint egy dollárba.

Fontos rámutatni, hogy a nanotechnológia legfontosabb következménye az lesz, hogy átviszi a szoftver gazdaságát a hardverre – azaz a fizikai termékekre. A szoftverárak még gyorsabban deflálódnak, mint a hardverárak (lásd a táblázatot).

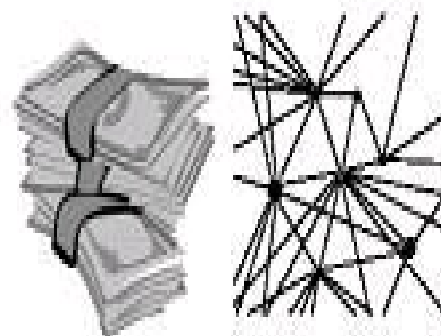
A szoftverek ár–teljesítmény-arányának exponenciális javulása^[132]

Példa: automatikus beszédfelismerő szoftver

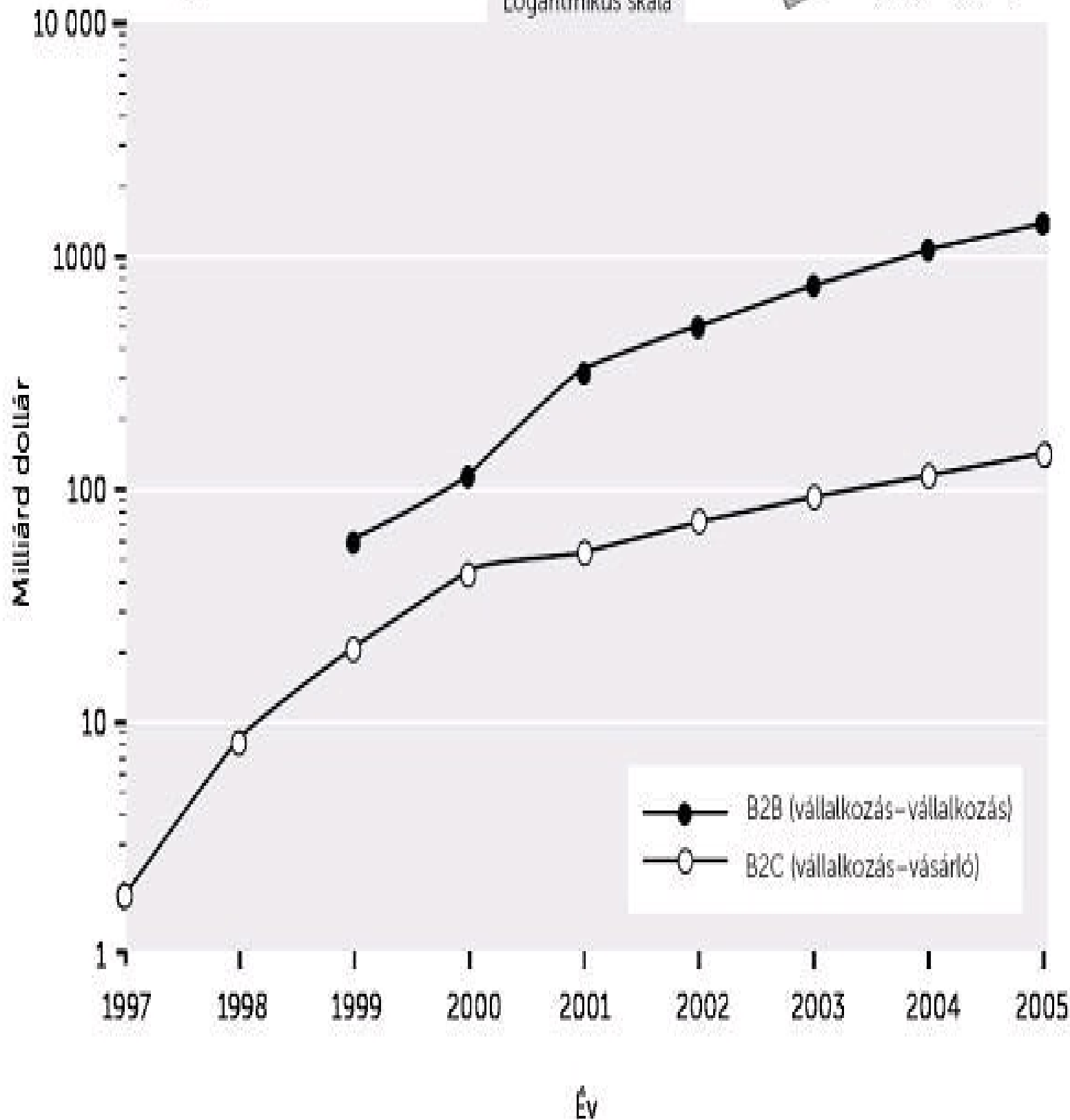
	1985	1995	2000
Ár (\$)	5000	500	50
Szótárméret (szavak száma)	1000	10 000	100 000
Összefüggő beszéd?	Nem	Nem	Igen
A szoftver betanítása (perc)	180	60	5
Pontosság	Gyenge	Elfogadható	Jó

A megosztott és intelligens kommunikáció hatásait leginkább talán az üzleti világban érezték meg. A Wall Street drámai hangulatváltozásai ellenére az úgynevezett e-vállalatoknak tulajdonított rendkívüli értékek az 1990-es évek konjunktúrájában helyes megfigyelést tükröztek: az üzleti világot évtizedeken át fenntartó üzleti modellek egy radikális átalakulás korai szakaszába értek. A vásárlóval való közvetlen, személyessé tett kommunikáción alapuló új modellek minden iparágat át fognak alakítani, súlyos csapást mérve a vásárlót a termék vagy a szolgáltatás előállítójától elválasztó közbülső, közvetítő rétegekre. Azonban minden forradalomnak megvan a maga sebessége, és a terület befektetési, valamint tőzsdei felértékelései messze túlhaladták ennek a gazdasági S-görbének az első szakaszait.

Elektronikus kereskedelmi bevételek az Egyesült Államokban



Logaritmikus skála



Az információtechnológiák konjunktúra-dekonjunktúra ciklusa szigorúan tőkepiaci (részvényértéki) jelenség volt. A valódi vállalkozás–vásárló (B2C, business-to-consumer) és vállalkozás–vállalkozás (B2B, business-to-business) adatokban sem konjunktúra, sem dekonjunktúra nem figyelhető meg (lásd a következő ábrát). A valódi B2C bevételek egyenletesen növekedtek, az 1997-es 1,8 milliárd dollárról a 2002-es 70 milliárd dollárig. A B2B hasonló egyenletességgel nőtt az 1999-es 56 milliárd dollárról a 2002-es 482 milliárd dollárra.^[133] 2004-ben megközelíti az egybillió dollárt. Ahogyan arról részletesen szoltam fentebb, az üzleti ciklusoknak semmilyen nyomát nem láthatjuk a háttérben rejlő technológiák valódi bevételi eredményeiben.

A tudáshoz való hozzáférés bővülése a hatalmi viszonyokat is megváltoztatja. A betegek egyre inkább az egészségügyi állapotukat és a lehetőségeiket ismerve keresik fel az orvosukat. A vásárlók automata szoftverek segítségével választják ki a legjobb árú és tudású termékeket, legyen szó kenyérpirítóról, autóról, házról, bankszámláról vagy biztosításról. Az olyan webes szolgáltatások, mint az eBay, soha nem látott módon, soha nem látott sebességgel kapcsolják össze az eladókat és a vásárlókat.

A vásárlók vágyai és kívánságai, amelyeket gyakran még ők maguk sem ismernek, egyre inkább az üzleti kapcsolatok hajtóerőivé válnak. Például az internetet jól ismerő ruhavásárlók nem sokáig fogják beérni a legközelebbi üzletben a polcokon maradt darabokkal. Inkább megnézik, hogyan festenének a lehetséges kombinációk a saját testükről készített háromdimenziós képen (egy részletes szkennelés alapján), kiválasztják a nekik tetsző anyagokat és a szabásokat, majd elkészítetik a ruhadarabot.

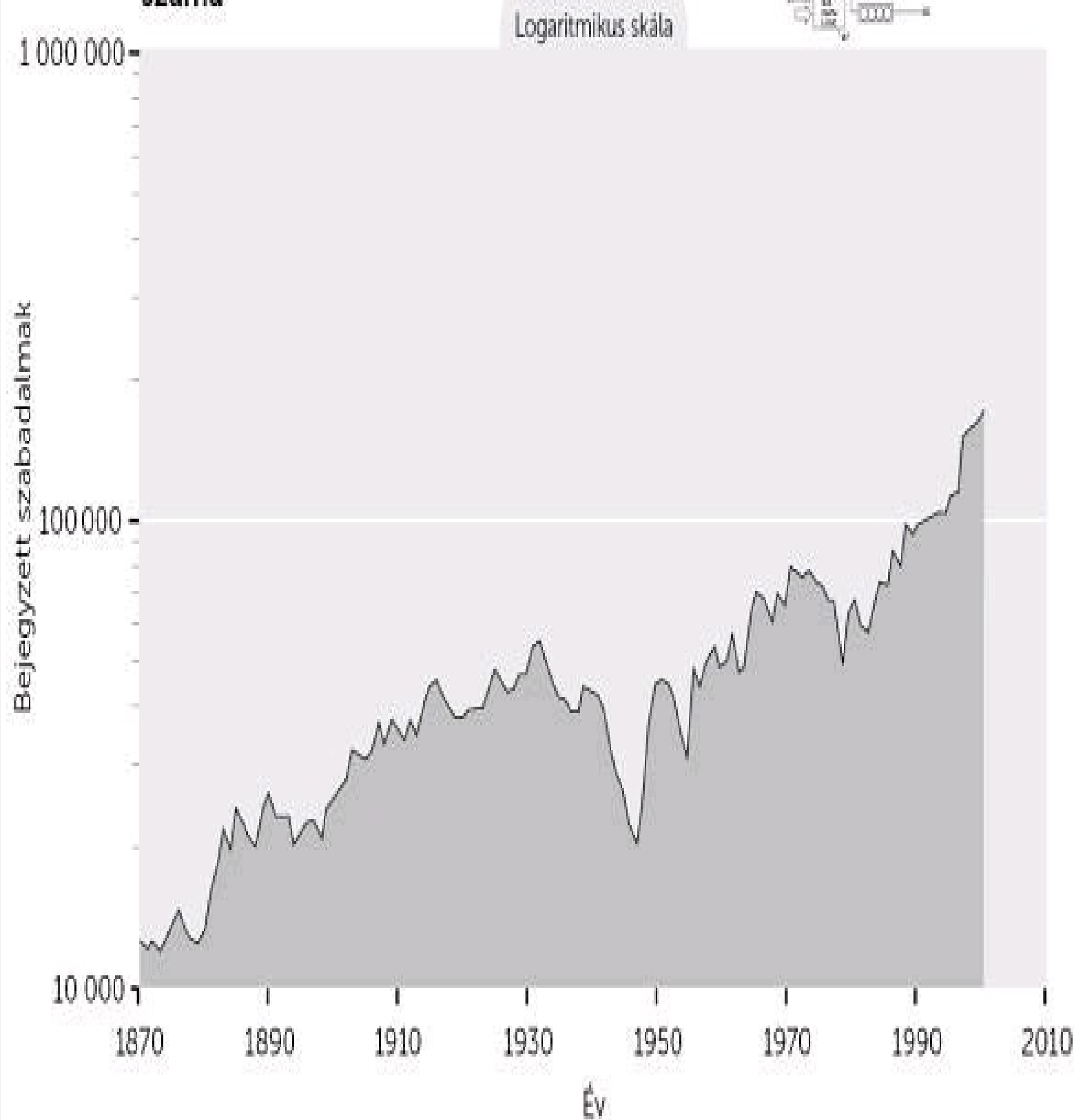
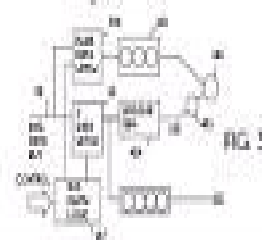
A webalapú kereskedelem jelenlegi hátrányai (például a termékek közvetlen szemügyre vételének a hiánya és a gyakori bosszúságok, amelyeket az eladók helyett rugalmatlan menükkel és űrlapokkal folytatott interakció okoz) fokozatosan el fognak tűnni, ahogy a trendek egyre inkább az elektronikus világnak kedveznek. Ennek az évtizednek a végére a számítógépek megszűnnek különálló fizikai objektumok lenni – a képernyők beépülnek a szemüvegekbe, az elektronikát beleszövik a ruháinkba, elhozva a teljes bemerülést biztosító virtuális valóságot. Ekkor az „ellátogatok egy weboldala” azt fogja jelenteni, hogy belépünk egy virtuális környezetbe – legalábbis a látó- és hallószerveink szempontjából –, ahol közvetlen interakcióba kerülhetünk a termékekkel és az emberekkel, valóságosakkal és szimuláltakkal egyaránt. Noha a szimulált emberek nem fognak felérni a valódiakkal – legalábbis 2009-ben még nem –, eladóknak, ügyintézőknek és kutatóasszisztenseknek jók lesznek. A taktilis (érintő) interfészek lehetővé teszik majd, hogy megérintsük a termékeket és az embereket. Nehéz felismerni a régi téglából és habarcsból álló világ bármely előnyét, amit ne haladnának meg végül a hamarosan beköszöntő, gazdag interaktív interfészek.

Ezeknek a fejleményeknek komoly hatásuk lesz az ingatlanpiacra. Egyre kevésbé lesz szükség arra, hogy az alkalmazottakat irodákba gyűjtsék össze. A saját cégeim tapasztalatai alapján mi már most képesek vagyunk hatékonyan megszervezni földrajzilag egymástól távol lévő csoportok munkáját, ami egy évtizeddel ezelőtt még sokkal nehezebb lett volna. A teljes bemerülést nyújtó, látványt és képet biztosító virtuális környezetek, melyek mindenhol meg fognak jelenni ennek az évszázadnak a második évtizedében, fel fogják gyorsítani azt a trendet, hogy az emberek ott lakjanak és dolgozzanak, ahol csak akarnak. Amint a rendelkezésünkre fognak állni az összes érzékszervre ható, teljes bemerülést biztosító virtuális környezetek, amelyek a 2020-as évek végén lesznek megvalósíthatóak, a valódi irodák értelmüket veszítik. Az ingatlan fogalma virtuálissá fog válni.

Ahogy arra Szun-ce rámutatott, „a tudás hatalom”, és a gyorsuló megtérülések törvényének egy másik ága az emberi tudás, beleértve a szellemi tulajdon exponenciális növekedése.

Az Egyesült Államokban bejegyzett szabadalmak száma⁹¹

U.S. Patent May 30, 1999 Sheet 2 of 5 5,646,990



Mindez persze nem azt jelenti, hogy a recesszió ciklusai el fognak tűnni. A közelmúltban gazdasági lassulás következett be az USA-ban, visszaesett a technológiai szektor, majd fokozatosan magához tért. A gazdaságot még mindig terhelik olyan háttérben zajló folyamatok, amelyek a történelem során recessziókat okoztak: például a tőkeigényes projektekbe történő túlságosan nagy mértékű befektetések, vagy a túlzott árubőség csapdái. Mivel azonban az információ gyors terjedése, az online vásárlás kifinomult formái és az egyre átláthatóbb piacok minden iparág területén tompították ezek életét, a „recesszióknak” valószínűleg kisebb közvetlen hatásuk lesz az életszínvonalunkra. Úgy tűnik, így volt ez az 1991–1993-as minirecesszió esetében is, de még nyilvánvalóbban ez történt a legutóbbi, a 2000-es évek elején bekövetkezett recesszió során. A hosszú távú növekedés exponenciálisan fog folytatódni.

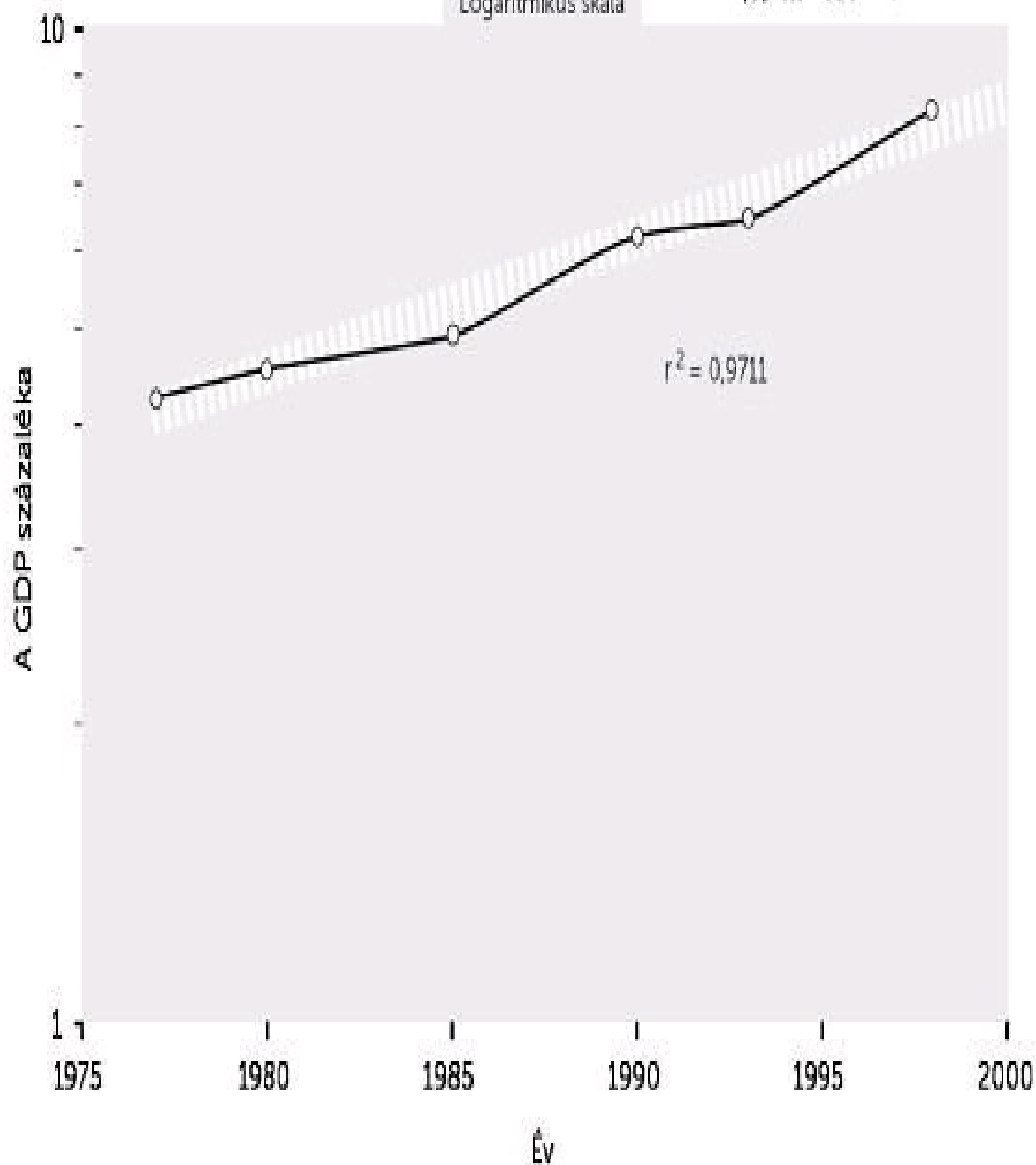
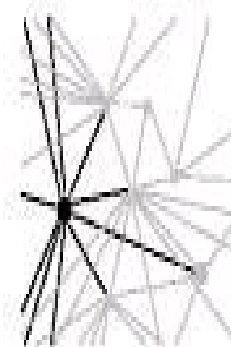
Mindemellett az innovációra és a paradigmaváltás sebességére nem gyakoroltak észrevehető hatást a gazdasági ciklusok okozta kisebb kilengések. Az előző oldalon lévő grafikonon ábrázolt exponenciálisan növekvő technológiák továbbra is fejlődnek, anélkül, hogy egy ütemet is kihagynának a jelenlegi gazdasági lassulások miatt. A piaci elfogadottság sem mutatja a konjunktúra és a dekonjunktúra jeleit.^[134]

A gazdaság összességének növekedése a gazdagság és érték teljesen új, korábban nem létező formáiról és rétegeiről árulkodik, melyek régebben nem alkották a gazdaság jelentős részét: például a nanorészecskékből álló anyagok, a genetikai információ, a szellemi tulajdon, a kommunikációs portálok, a honlapok, a sáv szélesség, a szoftverek, az adatbázisok és sok más, technológiaalapú kategória.

A teljes információtechnológiai szektor részesedése a gazdaságban gyorsan nő, és egyre nagyobb hatással van a többi szektorra, ahogyan az alábbi ábrán is látható.^[135]

Az információtechnológia részesedése a gazdaságban

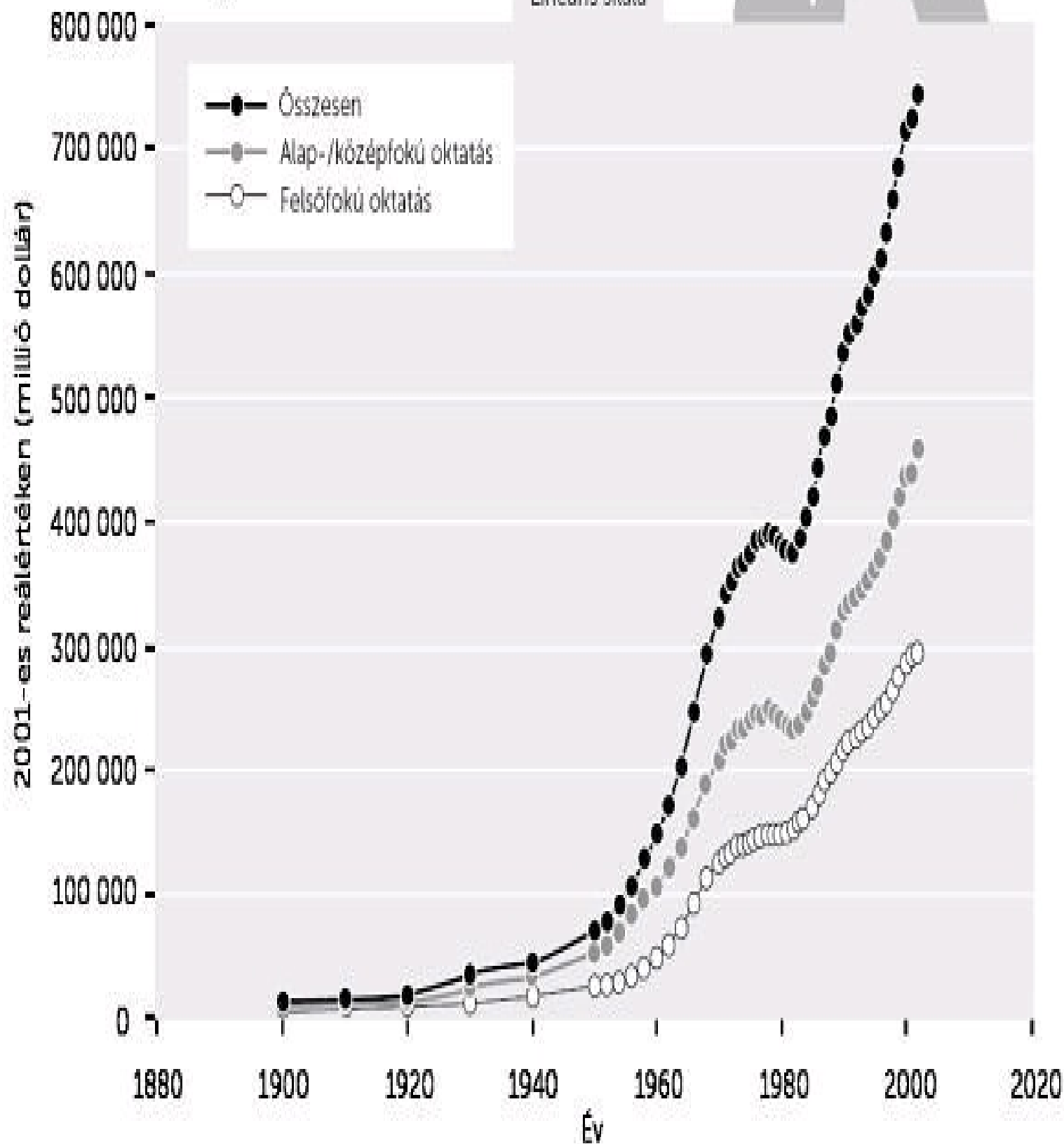
Logaritmikus skála



A gyorsuló megtérülések törvényének egy másik következménye az oktatási és tanulási rendszert jellemző értékek exponenciális növekedése. Az elmúlt 120 év során az alapfokú oktatásra (egy tanulóra vetítve, reálértéken) fordított befektetés körülbelül a tízszeresére nőtt. Az egyetemi hallgatók száma a százszorosára növekedett. Az automatizálás az izmaink erejének felerősítésével kezdődött, és most a szellemünk erejét kezdtük el fokozni. Az elmúlt két évszázadban az automatizálás megszüntette a legkisebb szakképzettséget igénylő munkákat, és új (jobban fizető) munkákat hozott létre a szakképzettségi skála másik, felső végén. A létra továbbra is felfelé növekszik, ennél fogva minden szinten exponenciálisan nőnek az oktatási ráfordítások (lásd az alábbi ábrát). [\[136\]](#)

Oktatási ráfordítások az Egyesült Államokban

Lineáris skála



Ó, és visszatérve a korábbi ajánlatra: gondoljunk bele, hogy a jelenlegi részvényárfolyamok a jövőbeni elvárásokon alapulnak! Tekintettel arra, hogy a (szó szerint) szűk látókörű lineáris intuitív nézet képviseli az általános szemléletmódot, a gazdasági várakozások drámaian alulbecsültek. Mivel a részvényárfolyamok a vevő–eladó piac konszenzusát tükrözik, az árak azt a mögöttes lineáris feltételezést képezik le, amit a többség tart a jövőbeli gazdasági növekedésről. A gyorsuló megtérülések törvényéből azonban egyértelműen az következik, hogy a növekedés továbbra is exponenciális marad, mert magának a fejlődésnek a sebessége is gyorsul.

MOLLY 2004: *De várjunk egy percet! Azt mondtad, hogy kapok nyolcvanbillió dollárt, ha elolvasom és megértem ezt a részt.*

RAY: *Pontosan. A modelljeim szerint, ha leváltjuk a lineáris szemléletet a helyesebb exponenciális szemlélettel, akkor a jelenlegi részvényárfolyamoknak meg kell triplázódniuk.*^[137] *Mivel az értékpapír-piacokon (óvatos becslések szerint) negyvenbillió dollár forog, nyolcvanbillió dollár lesz a növekmény.*

MOLLY 2004: *De azt mondtad, én fogok annyi pénzt kapni.*

RAY: *Nem, azt mondtam: olvassák el figyelmesen a mondatot! Én önökre, mindannyiukra gondoltam.*

MOLLY 2004: *Ez elég bosszantó. Úgy érted, mindenki, az egész világ? De nem fogja mindenki elolvasni ezt a könyvet.*

RAY: *Pedig mindenki elolvashatná. Ha mindenki elolvashatná és megértené, akkor a gazdasági elvárások a történelmi exponenciális modellen alapulnának, és megnőnének a részvényárfolyamok.*

MOLLY 2004: *Úgy érted, ha mindenki megérti és egyet is ért vele. A piac várakozásokra épül, igaz?*

RAY: *Oké, azt hiszem, ezt feltételeztem.*

MOLLY 2004: *Tehát erre számítasz?*

RAY: *Nos, igazából nem. Ha ismét a futurista bőrbe bújok, azt jósolom, hogy az exponenciális növekedés szemlélete végül győzni fog, de csak idővel, ahogy egyre több, a technológia exponenciális természetét és a gazdaságra gyakorolt hatásait igazoló bizonyíték kerül napvilágra. Ez fokozatosan fog végbemenni, a következő évtizedben, melynek során erőteljes, hosszú távú élénkülés fog bekövetkezni a piacokon.*

GEORGE 2048: *Nem is tudom, Ray. Abban igazad volt, hogy az információtechnológia minden formájának ár–teljesítmény-aránya exponenciális ütemben javult, és az exponens is folyamatosan nőtt. És valóban, a gazdaság exponenciálisan növekedett, és gond nélkül átvészelte a nagyon magas deflációt. Az is kiderült, hogy a társadalom nagy többsége felzárkózott ezekhez a trendekhez. Ám ez a felismerés nem volt olyan pozitív hatással a részvénytőzsiatokra, mint amilyenről te beszéltél. A részvénytőzsiatok együtt növekedett a gazdasággal, de a magasabb növekedési sebesség felismerése nem sokat tett a részvényárfolyamok növekedéséért.*

RAY: *Szerinted miért történt így?*

GEORGE 2048: *Mert egyvalamit kifelejtettél az egyenletedből. Noha az emberek felismerték, hogy a részvényárfolyamok gyorsan fel fognak ugrani, ugyanez a felismerés megnövelte a visszaszámítási arányt is (azt az arányt, amivel a jövőbeli értékeket csökkentenünk kell, hogy megtudjuk a jelenbeli értéküket). Gondolj csak bele! Ha tudnánk, hogy a jövőben jelentősen*

megnőnek a részvényárfolyamok, akkor most szeretnénk megszerezni a részvényeket, hogy később majd realizálhassuk a nyereséget. A megnövekedett jövőbeli árfolyamok felismerése tehát rögtön növeli a visszaszámítási arányt is. Ez pedig kioltja a magasabb jövőbeli értékekre való várakozást.

MOLLY 2004: Hú, George, azért sem állja meg a helyét. Logikusnak tűnik, amit mondasz, de a pszichológiai realitás az, hogy a megnövekedett jövőbeli értékekkel kapcsolatos felfokozott várakozás jelentette pozitív hatás jelentősebbnek bizonyult a részvényárfolyamokra nézve, mint a visszaszámítási arány növekedése keltette negatív hatás. Tehát a technológia ár-teljesítmény-aránya exponenciális javulásának, illetve a gazdasági tevékenység exponenciális növekedésének valóban árfolyamfelhajtó hatása volt a részvénytőzsián, de az árfolyamok nem triplázódtak meg, ahogy te mondtad, Ray, azok miatt a hatások miatt, amikről George beszélt.

MOLLY 2004: Oké, már bánom, hogy megkérdeztem. Azt hiszem, megtartom azt a néhány részvényt, amim van, és nem aggódom miattuk.

RAY: Mibe fektettél?

MOLLY 2004: Nézzük csak, itt van ez az új beszédvezérlésű keresőmotor, amely le akarja győzni a Google-t. Aztán befektettem még egy energiacellákkal foglalkozó cégbe is. Meg egy másikba, amelyik véráramba juttatható érzékelőket gyárt.

RAY: Ez elég magas kockázatú high-tech portfóliónak tűnik.

MOLLY 2004: Nem nevezném portfóliónak. Csak játszadózom a technológiákkal, amikről beszéltél.

RAY: Oké, de ne feledd, hogy bár a gyorsuló megtérülések törvénye által előrejelzett trendek elég egyenletesek, ez még nem jelenti azt, hogy meg tudjuk jósolni, melyik piaci versenyző fog nyerni!

MOLLY 2004: Igen, ezért is teszek több lóra.

Harmadik fejezet

Az emberi agy számítási képességeinek kihasználása

„Ahogyan azt az Engines of Creationben (A teremtés motorjai) tárgyaltam, ha valaki képes valódi MI-t építeni, akkor joggal feltételezhetjük, hogy olyan dolgokat is képes építeni, mint például a több milliószor gyorsabb neuronok. Ebből következően pedig képes létrehozni olyan rendszereket, amelyek az embernél milliószor gyorsabban gondolkodnak. Mesterséges intelligenciával felruházva ezek a rendszerek képesek tervezni. Hozzávéve ehhez a rendszernek azt a képességét, hogy olyasvalamit építsen, ami jobb, mint saját maga, megnyílik a lehetőség egy nagyon hirtelen bekövetkező átmenet előtt. Ezzel a helyzettel talán még annál is nehezebb mit kezdeni, mint a nanotechnológiával, ám jelenleg még annál is nehezebb konstruktívan gondolkodni róla. Ezért nem is állt az általam tárgyalt témák középpontjában, bár rendszeresen rámutatok, és jelzem: »Ez is fontos«.”

(Eric Drexler, 1989)

A számítástechnológia hatodik paradigmája: a háromdimenziós molekuláris számítás, és az ebből kinövő számítástechnika

Az *Electronics* 1965. április 19-ei számában Gordon Moore így írt: „Az integrált elektronika jövője magának az elektronikának a jövője. Az integráltság előnyei az egész elektronikát fel fogják lendíteni, és számos új területet nyitnak e tudományág előtt.”^[138] Moore ezekkel a visszafogott szavakkal olyan forradalmat indított el, amely még ma is egyre nagyobb lendületre tesz szert. Hogy érzékeltesse olvasóival, milyen mélyreható változásokat fog okozni ez az új tudomány, ezt jósolta: „1975-re a gazdaság ki fogja kényszeríteni, hogy akár 65 000 alkatrészt is rázsúfoljunk egyetlen szilíciumchipe.” Most képzeljük el!

Moore ebben a cikkében írt arról, hogy évente megduplázódik az egy integrált áramkörre zsúfolható tranzistorok száma (amikből a számítási elemek, a logikai kapuk felépülnek). Az 1965-ben született „Moore törvénye” előrejelzést születésekor több kritika is érte, mivel az egy chipe integrált alkatrészek számát ábrázoló, logaritmikus skálájú diagramján mindössze öt hivatkozási pontot vett fel (1959-től 1965-ig), így korainak tűnt az éppen csak kibontakozófélben lévő trend egészen 1975-ig való előrevetítése. Moore első becslése pontatlan volt, és egy évtizeddel később korrigálta is. Azonban az alapgondolat – az elektronika ár–teljesítmény-arányának exponenciális javulása az integrált áramkörökre zsúfolt tranzistorok méretének zsugorítása miatt – helyes és korát megelőző felismerés volt.^[139]

Ma nem több ezer, hanem több milliárd alkatrészről beszélünk. A legfejlettebb 2004-es chipekben a logikai kapuk mindössze ötven nanométer szélesek, s ezzel már bőven a nanotechnológia birodalmába esnek (ami a száz nanométernél kisebb nagyságrenddel foglalkozik). Rendszeresen megjósolták, hogy Moore törvénye érvényét fogja veszíteni, ennek a figyelemre méltó paradigmának a vége mégis egyre jobban kitolódik az időben. Paolo Gargini, az Intel technológiai stratégiájának

igazgatója, a nagy befolyással rendelkező ITRS („Nemzetközi technológiai ütemterv a félvezetőkre”, *International Technology Roadmap for Semiconductors*) elnöke a közelmúltban így nyilatkozott: „Úgy látjuk, hogy legalább az elkövetkező 15-20 évben továbbra is támaszkodhatunk Moore törvényére. Sőt... a nanotechnológia számos új paramétert kínál még fel, melyeket variálva még több alkatrészt zsúfolhatunk egy chipre.”^[140]

A számítástechnika felgyorsulása mindent átalakított, a társadalmi és gazdasági kapcsolatokról kezdve a politikai intézményekig, ahogyan azt a könyv hátralévő részében szemléltetni is fogom. Moore azonban arra nem mutatott rá az írásaiban, hogy a csíkszélesség csökkentése valójában nem az első olyan paradigma volt, amely exponenciális növekedést okozott a számítástechnikában és a kommunikációban, hanem az ötödik, és már most láthatjuk a következőnek a körvonalait: a molekuláris szintű, háromdimenziós számítástechnikáét. Noha az ötödik paradigma élettartamából még több mint egy évtized hátravan, lenyűgöző fejlődés következett be mindazon technológiák területén, melyek előfeltételei a hatodik paradigmának. A következő részekben elemzem az emberi intelligenciaszint eléréséhez szükséges számítási és memóriakapacitást, és azt, hogy miért lehetünk biztosak abban, hogy olcsó számítógépekkel is elérjük ezt a szintet a következő két évtized során. Még ezek a nagy teljesítményű számítógépek is messze lesznek az optimálistól. A fejezet utolsó szakaszában áttekintem a ma ismert fizikai törvények által a számítási teljesítmény további növekedése elé állított korlátokat. Ezzel eljutunk a körülbelül a XXI. század végi számítógépekhez.

A híd a 3D-s molekuláris számításához. Már megtörténtek a közbülső lépések: a háromdimenziós, molekuláris számítástechnika paradigmájához elvezető új technológiák között találjuk a nanocsöveket és a nanocsövek alkotta áramköröket, a molekuláris számítástechnikát, az önszerveződő nanocsöveket, az áramköröket emuláló biológiai rendszereket, a DNS-sel végzett számításokat, a spintronikát (az elektronok spinjével végzett számításokat), a fényen alapuló és a kvantum-számítástechnikát. Ezek közül az egymástól független technológiák közül több is integrálható azokba a számítórendszerekbe, melyek végül meg fogják közelíteni az anyag és az energia elméleti maximális számítási kapacitását, és messze meg fogják haladni az emberi agy hasonló lehetőségeit.

A háromdimenziós áramkörök építésének egyik megközelítése a „hagyományos” szilíciumnyomtatás felhasználása. A Matrix Semiconductor már jelenleg is forgalmaz olyan memóriachipeket, amelyekben nem egyetlen sík réteg van, hanem több, egymásra helyezett tranzisztorsík.^[141] Mivel egyetlen háromdimenziós chip több memóriát tartalmaz, a teljes termékméret csökken, így a Matrix alapvetően a hordozható elektronikai eszközök piacát célozta meg, ahol a flashmemóriával (amit a mobiltelefonokban és a digitális kamerákban alkalmaznak, mivel kikapcsolás után sem vesz el a tartalmuk) kíván versenyezni. A többrétegű áramköröknél az egy termékre eső előállítási költség is csökken. A Matrix egyik versenytársa, Maszuoka Fudzio, a Toshiba egykori mérnöke, a flashmemória feltalálója más megközelítést alkalmaz. Maszuoka azt állítja, hogy az általa tervezett új memóriafelépítés, ami egy hengerre hasonlít, egytizedére csökkenti a memóriák méretét és előállítási költségét a lapos chipekhez képest.^[142] A Renssealer Polytechnic Institute’s Center for Gigascale Integration és az MIT Media Lab már működő háromdimenziós szilíciumchip-prototípust is bemutatott.

A tokiói Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT) drámai háromdimenziós technológiát mutatott be elektronsugaras litográfia alkalmazásával, mely révén tetszőleges háromdimenziós struktúrák állíthatók elő akár tíz nanométeres méretfelbontásban is.^[143] Az NTT a bemutató során a Föld nagy felbontású modelljét hozta létre, hatvan mikron méretben, tíz nanométeres

részletekkel. Az NTT állítása szerint a technológia alkalmas elektronikai alkatrészek, például félvezetők, illetve nanoméretű mechanikus rendszerek előállítására is.

Még mindig a nanocsövek a befutók. A *The Age of Spiritual Machines* (A spirituális gépek kora) című könyvemben a nanocsövekről – három dimenzióba rendezett, memóriabitek tárolására és logikai kapukként használt molekulákról – véltem azt, hogy el fognak vezetni a háromdimenziós molekuláris számítástechnika korába. Az először 1991-ben szintetizált nanocsövek hatszögletű hálóban összekapcsolódott és felhengerített szénatomokból állnak.^[144] A nanocsövek nagyon kicsik: az egyrétegű falúak átmérője mindössze egy nanométer, így igen nagy lehet a sűrűségük.

Emellett potenciálisan nagyon gyorsak. A Kaliforniai Egyetemen Peter Burke és kollégái a közelmúltban 2,5 gigahertzen (GHz) működő, nanocsövek alkotta áramköröket mutattak be. Ugyanakkor a *Nano Letters*-ben, az Amerikai Vegyészeti Társaság preferált lapjában Burke azt írta, hogy ezeknek a nanocsőtranzisztoroknak az elméleti sebessége „egy terahertz (1 THz = 1000 GHz) lehet, ami körülbelül ezerszer nagyobb, mint a modern számítógépek sebessége.”^[145] A technológia teljes beérése után egy köbcentiméternyi nanocsőáramkör tízmilliószor nagyobb teljesítményű lenne, mint az emberi agy.^[146]

A nanocsőáramköröket sok vita övezte, amikor 1999-ben írtam róluk, ám az elmúlt hat év során drámai fejlődés történt a technológiában. 2001 két nagy lépést is hozott. A *Science* 2001. július 6-i számában beszámoltak egy mindössze 1×20 nanométer nagyságú nanocső alapú tranzisztorról, amely szobahőmérsékleten működött, és egyetlen elektront használt a ki- és bekapcsolásra.^[147] Körülbelül ezzel egy időben az IBM bemutatott egy ezer nanocső alapú tranzisztorot tartalmazó integrált áramkört.^[148]

A közelmúltban láthattuk a nanocső alapú áramkörök első működő modelljeit. 2004 januárjában a Kaliforniai Egyetem és a Stanford Egyetem kutatói létrehoztak egy nanocsöveken alapuló integrált memóriaáramkört.^[149] Ennek a technológiának az egyik nehézsége az, hogy egyes nanocsövek vezetők (azaz egyszerűen csak továbbítják az elektromosságot), míg mások félvezetőkként viselkednek (azaz képesek ki- és bekapcsolt állapotot felvenni, és így logikai kapukat alkotni). Ez a különbség nagyon finom szerkezeti eltéréseken múlik. Egészen a közelmúltig manuális beavatkozással kellett szétválogatni a két típust, ami nagyméretű áramkörök építése esetén nem lenne túl praktikus. A Berkeley és a Stanford tudósai azzal oldották meg a problémát, hogy kifejlesztettek egy teljesen automatizált eljárást a nem félvezető nanocsövek kiválogatására és elvetésére.

A nanocsövek elrendezése egy másik probléma az áramkörök felépítése során, mivel hajlamosak minden irányban növekedni. 2001-ben az IBM tudósai bemutatták, hogy a nanocső-tranzisztorok nagy mennyiségben is növeszthetők, hasonlóan a szilíciumtranzisztorokhoz. A „konstruktív rombolásnak” nevezett módszert alkalmazták, ami már az ostyán megsemmisíti a hibás nanocsöveket, elejét véve a kézi válogatásnak. Thomas Theis, az IBM Thomas J. Watson Kutatóközpontja fizika részlegének igazgatója akkor ezt mondta: „Hisszük, hogy az IBM ezzel fontos mérföldkövet ért el a molekuláris szintű chipek felé vezető úton... Ha sikerrel járunk, a szén nanocsövek lehetővé fogják tenni, hogy a sűrűség tekintetében korlátlan ideig fenntartsuk Moore törvényét, mivel nagyon kevés kétségem van afelől, hogy a nanocsőtranzisztorok bármilyen jövőbeni szilíciumtranzisztornál kisebbek lehetnek.”^[150] 2003 májusában a Nantero, egy kis woburni (Massachusetts állam) cég, melynek az egyik alapítója Thomas Rueckes, a Harvard Egyetem kutatója volt, egy lépéssel tovább vitte a folyamatot, amikor bemutatott egy 1 lapkát tartalmazó ostyát, rajta tízmilliárd, egytől egyig a megfelelő irányban álló nanocső-keresztezéssel. A Nantero eljárása hagyományos litográfiai

berendezésekkel, automatikusan távolítja el a nem megfelelő irányban álló nanocsöveket. Az, hogy a Nantero hagyományos berendezéseket használt, lázba hozta az ipari megfigyelőket, ez a technológia ugyanis nem igényelne költséges új gyártósorokat. A Nantero megoldása véletlen hozzáférést és tartósságot (az adatok nem vesznek el a kikapcsoláskor) biztosít, ami azt jelenti, hogy potenciálisan felválthatja az összes korábbi memóriefajtát: a RAM-ot, a flashmemóriát és a diszket.

Számítások molekulákkal. A nanocsövek mellett az elmúlt években komoly előrehaladás történt az egy vagy néhány molekulával végzett számítások terén is. A molekulákkal való számítás gondolatát az 1970-es évek elején vetette fel Avi Aviram az IBM-től és Mark A. Ratner a Northwestern University-től.^[151] Akkoriban nem álltak rendelkezésünkre a szükséges technológiák, így az ötlet megvalósításához előrelépéseknek kellett történniük az elektronika, a fizika, a kémia és még a biológiai folyamatok visszafejtése terén is.

2002-ben a Wisconsin Egyetem és a Bázeli Egyetem tudósai létrehoztak egy „atomi memóriameghajtót”, amely atomokat használt egy merevlemez emulálására. Egy pásztázó alagútmikroszkóppal (STM) le lehetett választani egy szilíciumatomot egy száz másikkól álló tömbről, illetve hozzá lehetett adni ahhoz. A kutatók szerint ezzel az eljárással a rendszer több milliószor nagyobb adatmennyiség tárolására lehet képes, mint egy hasonló méretű diszk – az adatsűrűsége elérheti a 250 terabitet négyzet hüvelykenként –, bár a bemutatón ezt csak néhány bittel szemléltették.^[152]

A Peter Burke által a molekuláris áramkörök kapcsán megjósolt egy terahertzes sebesség egyre pontosabbnak tűnik, ha az Illinois-i Egyetem tudósai által létrehozott nanoméretű tranzisztort nézzük, amely 604 gigahertzes frekvencián (több mint fél terahertzen) működik.^[153]

Az egyik molekula, amely a kutatók megállapítása szerint a számítás szempontjából kívánatos tulajdonságokkal rendelkezik, a „rotaxán”, amely az által képes átváltani az állapotait, hogy megváltoztatja a molekula belsejében lévő, gyűrűszerű struktúra energiaszintjét. A rotaxánmemóriát és elektronikus kapcsolóeszközöket már bemutatták, és potenciálisan száz gigabit (10¹¹ bit) tárolására lehetnek alkalmasak négyzet hüvelykenként. Ez a potenciál még nagyobb is lehet, ha három dimenzióba szervezik.

Önösszeszerelés. A nanoméretű áramkörök önösszeszerelése a hatékony nanoelektronika egy másik kulcsfontosságú előfeltétele. Az önösszeszerelés lehetővé teszi, hogy a nem megfelelően létrejött alkatrészek automatikusan elvetésre kerüljenek, és az áramköröket alkotó alkatrészek, melyek száma akár a billiót is elérheti, önmagukat szervezzék a kívánt rendbe, ne pedig egy felülről irányított, fáradságos folyamatra legyen szükség ehhez. Az UCLA tudósai szerint ez a technológia lehetővé tenné, hogy a nagyméretű áramköröket kémcsövekben hozzák létre, ne pedig több milliárd dollárba kerülő gyárakban; kémiai folyamatok révén, nem pedig litográfiával.^[154] A Purdue Egyetem kutatói már bemutattak önszervező nanocsőstruktúrákat, melyek ugyanazt az elvet alkalmazzák, amely a DNS-szalakat arra készíti, hogy stabil helikális szerkezetté kapcsolódjanak össze.^[155]

A Harvard Egyetem tudósai kulcsfontosságú lépést tettek meg 2004 júniusában, amikor bemutattak egy másik, nagyobb léptékben is használható önszervező módszert.^[156] Az eljárás elején fotolitográfiai úton létrehozzák csatlakozások (a számítási elemek közötti kapcsolódási pontok) hálózatát, majd nagy számú, nanovezetékből készült térvezérlésű tranzisztort (egy gyakori tranzisztorfajta) és nanoméretű csatlakozást helyeznek el a hálózaton, amelyek aztán a megfelelő mintázatban összekapcsolódnak egymással.

2004-ben a Dél-Kaliforniai Egyetem és a NASA Ames Kutatóközpontja kutatói bemutattak egy módszert, melynek alkalmazásával rendkívül sűrű áramkörök szerveződnek egy oldatban.^[157] Az eljárás során spontán módon nanovezetékek jönnek létre, majd három bit adat tárolására alkalmas nanoméretű memóriacellák szerelik össze magukat a vezetékeken. A technológia tárolókapacitása 258 gigabit négyzethüvelykenként (ami a kutatók szerint a tízszeresére növelhető), szemben a flashmemória-kártyák 6,5 gigabitjével. 2003-ban az IBM mutatott be olyan működő memóriaeszközt, melyben polimerek szerveződtek húsz nanométer széles, hatszögletű struktúrákba.^[158]

Fontos megjegyezni, hogy a nanoáramkörök önmaguk konfigurálására is képesek lehetnek. Az áramköri elemek nagy száma és eredendő sérülékenysége (aminek a kis méret az oka) elkerülhetetlenné teszi, hogy az áramkör bizonyos részei helytelenül működjenek. Gazdasági szempontból célszerűtlen lenne egy teljes áramkört kidobni pusztán azért, mert egybillió tranzisztor közül néhány nem működik. A probléma megoldása abban rejlik, hogy a jövőbeni áramkörök folyamatosan figyelni fogják a saját teljesítményüket, és ugyanúgy a megbízhatatlan részeit megkerülő útvonalakon fogják továbbítani az információt, mint ahogy az internet forgalma is kikerüli a nem működő csomópontokat. Az IBM különösen aktív ezen a kutatási területen, és már ki is fejlesztett olyan mikroprocesszorokat, melyek automatikusan diagnosztizálják a problémákat és ennek megfelelően újrakonfigurálják a chip erőforrásait.^[159]

A biológia emulálása. Az önmagukat replikáló vagy önszervező elektronikus és mechanikus rendszerek építésének a gondolatát a biológia ihlette, ami pontosan ezeken a jellemzőkön alapul. Egy a *Proceedings of the National Academy of Sciences* lapjain megjelent kutatás leírta a prionokon, azaz önmagukat replikáló fehérjéken alapuló önreplikáló nanovezetékek létrehozásának módszerét. (Ahogyan arra a 4. fejezetben kitérek, úgy tűnik, az egyik prion szerepet játszik az emberi emlékezet működésében, egy másik formáját pedig a Creutzfeldt–Jakob-betegség, a kergemarhakór emberi megfelelője okozójának tartják.)^[160] A projekttel foglalkozó csoport fizikai stabilitásuk miatt használta modellnek a prionokat. Mivel azonban a prionok alapvetően nem vezetik az elektromosságot, a tudósok létrehoztak egy genetikailag módosított változatot, benne egy vékony aranyréteggel, ami alacsony ellenállású elektromos vezető. Susan Lindquist, az MIT biológiai professzora, a kutatás vezetője, a következő megjegyzést tette: „A nanoáramkörökkel foglalkozók többsége »fentről lefelé« próbálja létrehozni azokat. Mi arra gondoltunk, hogy megpróbálkozunk a »lentől felfelé« megközelítéssel, és hagyjuk, hogy a molekuláris önösszeszerelés végezze el helyettünk a munka oroslánrészét.”

A legközismertebb önreplikáló molekula a biológiában természetesen a DNS. A Duke Egyetem kutatói „csempéknek” elnevezett molekuláris építőelemeket hoztak létre önösszeszerelő DNS-molekulákból.^[161] A kereszt alakú csempékből létrejövő struktúrát is szabályozni tudták, „nanorácsokat” hozva létre belőlük. Ez az eljárás automatikusan fehérjemolekulákat csatol a nanorács minden egyes cellájába, melyeket aztán számítási műveletek elvégzésére lehet használni. Bemutattak egy kémiai folyamatot is, amely a DNS-nanoszalagokat ezüsttel bevonva elektromosan vezető nanovezetékeket hozott létre. A *Science* 2003. szeptember 26-i számában megjelent cikkhez fűzött megjegyzésében a kutatásokat vezető Hao Yan ezt mondta: „Évek óta kerestük, hogyan tudnánk felhasználni a DNS önösszeszerelő képességét arra, hogy sablonokat hozzunk létre fehérje- vagy egyéb molekulák számára, és most először sikerült ilyen tisztán demonstrálnunk ezt a lehetőséget.”^[162]

Számítások a DNS-sel. A DNS a természet saját nanotervezésű számítógépe, és az

információtárolásra, illetve a molekuláris szintű logikai műveletvégzésre való képességét már felhasználták speciális „DNS-számítógépekben”. A DNS-számítógép lényegében egy kémcső, tele vízzel, amiben több billió DNS-molekula van, és mindegyik molekula egy-egy számítógépként viselkedik.

A számítás célja az, hogy megoldjunk egy problémát, ahol a megoldást szimbólumok egy sorozatával fejezzük ki. (Például egy szimbólumsorozat jelölhet egy matematikai bizonyítást, de akár csak egy szám számjegyeit is.) A DNS-számítógép a következőképpen működik: létrehoznak egy kis DNS-szálat, egyedi kódot használva minden egyes szimbólumhoz. A „polimeráz láncreakció” (*polymerase chain reaction, PCR*) nevű folyamat révén mindegyik ilyen szál több billiószor lemásolódik. Ezután ezeket a DNS-termékeket beteszik egy kémcsőbe. Mivel a DNS-nek affinitása van arra, hogy összekapcsolja a szálakat, automatikusan hosszú szálak jönnek létre, melyek egyes szakaszai az egyes szimbólumoknak felelnek meg, s a létrejövő hosszú szálak mindegyike egy-egy lehetséges válasz a problémára. Mivel több billió ilyen szál jön létre, mindegyik lehetséges válaszra (azaz mindegyik lehetséges szimbólumsorozatra) több szál jut.

A folyamat következő lépése az, hogy *egyszerre* ellenőrzik az összes szálat. Ezt speciálisan tervezett enzimekkel végzik el, melyek elpusztítják azokat a szálakat, amelyek nem felelnek meg bizonyos kritériumoknak. Az enzimeket egymás után bocsátják a kémcsőbe, és a sorrend pontos megtervezése révén a folyamat végül kitörli az összes helytelen szálat, és csak azokat hagyja meg, amelyek a problémára adható helyes válasznak felelnek meg. (A folyamat pontosabb leírását lásd a 26. jegyzetben.^[163])

A DNS-sel végzett számítás erejének kulcsa abban rejlik, hogy a több billió szál egy időben történő ellenőrzését teszi lehetővé. 2003-ban a Weizmann Intézet tudósai Ehud Shapiro vezetésével adenzin-trifoszfáttal (ATP), a biológiai rendszerek – mint az emberi test – természetes üzemanyagával kombináltak DNS-t.^[164] Ezzel a módszerrel az összes DNS-molekula képes lett számítások elvégzésére és ellátta magát energiával. A Weizmann Intézet tudósai bemutattak egy konfigurációt, amely két kanálnyi folyékony szuperszámítógép-rendszerből állt, harmincmillió-milliárd molekuláris számítógépet tartalmazott, és másodpercenként 660 billió ($6,6 \times 10^{14}$) számítási művelet elvégzésére volt képes. Ezeknek a számítógépeknek rendkívül alacsony az energiafogyasztása, a harmincmillió-milliárd számítógép együttesen mindössze ötven mikrowattot használt fel.

Ugyanakkor a DNS-sel végzett számításnak is megvannak a korlátai: a sokbillió számítógép mindegyikének ugyanabban az időben ugyanazt a számítást kell elvégeznie (bár más adatokkal), tehát az eszköz egy „egy utasítás, több adat” (*single instruction, multiple data, SIMD*) architektúra. Noha léteznek fontos problémacsoportok, amelyek SIMD-rendszerekkel megoldhatók (például minden pixel feldolgozása egy kép javítása vagy tömörítése során, vagy a kombinatorikai-logikai feladatok megoldása), általános célú algoritmusokat nem lehet beléjük programozni, hogy minden egyes DNS-számítógép más feladatot vagy részfeladatot hajtson végre. (Megjegyzés: a Purdue Egyetem és a Duke Egyetem korábban említett kutatási projektjei, melyek önösszeszerelő DNS-szálakból hoznak létre háromdimenziós struktúrákat, mások, mint az itt bemutatott, DNS-sel végzett számítások. Azokban a kutatásokban benne rejlik a lehetőség, hogy tetszőleges, nem a SIMD-architektúrára korlátozott konfigurációkat is létrehozzanak.)

Számítások a spinen. Az elektronoknak a negatív elektromos töltésükön kívül van még egy jellemzőjük, amit fel lehet használni memóriaként és számítások végzésére: a spin (melynek

klasszikus fizikai analógiája a perdület). A kvantummechanika szerint az elektronok egy tengely körül forognak, mint ahogy a Föld forog a saját tengelye körül. Ez persze csak egy szemléletes kép, mivel az elektronok egyetlen pontot foglalnak el a térben, és nehéz elképzelni, hogy egy kiterjedés nélküli pont saját tengelye körül forogjon. Mindazonáltal amikor egy elektromos töltés mozgásba jön, valós és mérhető mágneses mezőt hoz létre. Egy elektron két irányban foroghat, ezek szokásos elnevezése „fel” és „le”, és ezt a tulajdonságot fel lehet használni logikai kapcsolóként, vagy 1 bit adat tárolására.

A spintronikában az az izgalmas, hogy nincs szükség energiára egy elektron spinállapotának a megváltoztatásához. Shoucheng Zhang, a Stanford Egyetem fizikaprofesszora, és Nagaosza Naoto, a Tokiói Egyetem fizikaprofesszora a következőképpen fogalmazta ezt meg: „Egy új »Ohm-törvény« [mely szerint egy vezetőben mérhető áramerősség a feszültség és a vezető ellenállásának a hányadosa] megfelelőjét fedeztük fel... [Ez az új törvény] kimondja, hogy az elektron spinje bármiféle energiavesztés vagy szivárgás nélkül továbbítható. Emellett a jelenség szobahőmérsékleten, a félvezetőiparban már most széles körben használt anyagokban, például gallium-arzenidben is megfigyelhető. Ez azért fontos, mert lehetővé teszi a számítógépek egy új nemzedékének a létrehozását.”^[165]

Ezek szerint lehetségessé válhat a szupravezetők hatékonyságának az elérése (azaz az információ fénysebességgel vagy közel fénysebességgel történő, veszteség nélküli továbbítása) szobahőmérsékleten. A módszer ugyanakkor az elektron egynél több jellemzőjét is felhasználja a számításhoz, s ezzel megnöveli a kapacitását a memória, illetve a számítási sűrűség tekintetében.

A spintronika egyik formája már ismert a számítógép-felhasználók körében: a mágneses merevlemezekben a magnetorezisztanciát (az elektromos ellenállás megváltozását külső mágneses tér hatására) használják fel az adatok tárolására. A nem felejtő memóriák egyik izgalmas, új formája az MRAM (*magnetic random-access memory*; mágneses, véletlen hozzáférésű memória) is a spintronikán alapul, és feltehetőleg néhány éven belül piacra is kerül. A merevlemezekhez hasonlóan az MRAM szintén megőrzi az adatokat kikapcsolás után is, ám nincsenek benne mozgó alkatrészek, a sebessége és az újraírhatósága pedig a hagyományos RAM-éhoz hasonlítható.

Az MRAM ferromágneses fémötvözetekben tárolja az információt, melyek adattárolásra alkalmasak, a mikroprocesszorok logikai műveleteinek végrehajtására azonban nem. A spintronika Szent Grálja a gyakorlati spintronikai hatások elérése a félvezetőkben, ami lehetővé tenné, hogy a technológiát memóriákban és logikai áramkörökben is alkalmazzuk. Ma a chipgyártás a szilíciumon alapul, ami azonban nem rendelkezik a szükséges mágneses tulajdonságokkal. 2004 márciusában egy nemzetközi kutatócsoport bejelentette, hogy szilícium és vas keverékéhez kobaltot adalékolva, az új anyag képesnek bizonyult felmutatni a spintronikához szükséges mágneses tulajdonságokat, miközben megtartotta a szilícium kristályszerkezetét is, ami szükséges a félvezetéshez.^[166]

Nyilvánvaló, hogy a spintronika fontos szerepet fog játszani a számítógépek memóriájának a jövőjében, és valószínűleg a logikai rendszerekben is. Az elektron spinje kvantumtulajdonság (azaz a kvantummechanika törvényei vonatkoznak rá), így a spintronika legfontosabb alkalmazási területét talán a kvantumszámítógépek alkotják, melyek a kvantumállapotú elektronok spinjét felhasználva fogják ábrázolni a qubiteket (kvantumbiteket). Erről a későbbiekben írok.

A spint arra is felhasználták, hogy az atommagokban tároljanak információt, a protonok mágneses momentumának bonyolult kölcsönhatásait kiaknázva. Az Oklahomai Egyetem tudósai bemutattak egy „molekuláris fotográfia” eljárást is, mellyel 1024 bit adatot tároltak egyetlen, tizenkilenc hidrogénatomból álló folyadékkristály-molekulában.^[167]

Számítások a fényvel. A SIMD-számítások másik megközelítése az, hogy több lézersugarat használnak, egy-egy fotonnyalámban kódolva az információt. Ezután optikai elemekkel logikai és aritmetikai műveleteket lehet végrehajtani a kódolt információnyalábokon. Például egy kis izraeli cég, a Lenslet, kifejlesztett egy rendszert, amely 256 lézert használ, és másodpercenként nyolcbillió számítást képes elvégezni, ugyanazt a műveletet hajtva végre mind a 256 adatfolyamon.^[168] A rendszer felhasználható például 256 videocsatorna párhuzamos adattömörítésére.

A SIMD-technológiáknak, mint például a DNS- és optikai számítógépeknek fontos, különleges szerepük lesz a számítástechnika jövőjében. Az emberi agy funkcionalitása bizonyos aspektusainak, például az érzékszervi adatok feldolgozásának lemásolása során felhasználhatjuk a SIMD-architektúrákat. Más agyi területekhez, például azokhoz, amelyek a tanulásért és az érvelésért felelősek, általános célú, „több utasítás, több adat” (*multiple instruction multiple data, MIMD*) architektúrákra lesz szükség. A nagy teljesítményű MIMD-számításokhoz a fentebb ismertetett háromdimenziós molekuláris számítógépeket kell majd alkalmaznunk.

Kvantumszámítások. A kvantum-számítástechnika a SIMD-architektúra párhuzamos működésének még radikálisabb formája, ám még fejlődése sokkal korábbi szakaszában jár, mint a többi tárgyalt technológia. A kvantumszámítógép egy sor qubitből áll, melyek lényegében egyszerre nullák és egyesek. A qubit a kvantummechanikában inherensen meglévő, alapvető határozatlanságon alapul. Egy kvantumszámítógépben a qubiteket részecskék kvantumtulajdonságai képviselik – például az egyes elektronok spinállapota. Amikor a qubitek „kevert” állapotban vannak, mindkét állapot egyszerre jellemzi őket. A „kvantumdekoherenciának” nevezett folyamat során minden egyes qubit határozatlansága eldől, és létrejön az egyesek és nullák határozott sorozata. Ha megfelelően állítják be a kvantumszámítógépet, a dekoherált sorozat fogja jelenteni a probléma megoldását. A dekoherencia folyamata után lényegében csak a helyes sorozat maradhat meg.

Ahogy a fentebb tárgyalt DNS-számítógép esetében is, a sikeres kvantumszámítás kulcsa a probléma gondos megfogalmazása, és a lehetséges válaszok pontos ellenőrzése. A kvantumszámítógép gyakorlatilag a qubitek értékeinek minden lehetséges *kombinációját* ellenőrzi. Egy ezer qubitet tartalmazó kvantumszámítógép tehát 2^{1000} (ez az érték megközelítőleg egy eggyessel és utána 301 nullával írható le) lehetséges megoldást vizsgál egyszerre.

Egy ezer bites kvantumszámítógép teljesítménye nagyságrendekkel nagyobb lenne bármilyen elképzelhető DNS-számítógépénél, vagy ami azt illeti, bármilyen elképzelhető hagyományos (nem kvantum-) számítógépénél. A folyamatnak azonban van két korlátja. Az első az, hogy akárcsak a fentebb tárgyalt DNS- és optikai számítógépek esetében, a kvantumszámítógépek csak meghatározott típusú problémák megoldására alkalmazhatók. A feltétel: lényegében képesnek kell lennünk valamilyen egyszerű módszerrel megvizsgálni az összes lehetséges választ.

A kvantumszámítások gyakorlati alkalmazására a klasszikus példa a nagyon nagy számok faktoriális tényezőkre bontása (annak a megtalálása, hogy mely kisebb számokat kell összeszorozni a nagy szám eléréséhez). Az 512 bitnél nagyobb számok tényezőinek megkeresése jelenleg megoldhatatlan a digitális számítógépekkel, még az erősen párhuzamos működésűekkel sem.^[169] A kvantumszámítógépekkel megoldható érdekes problémacsoportok közé tartozik a titkosítások feltörése (ami a nagy számok faktoriális tényezőkre bontásán alapul). A másik korlát az, hogy a kvantumszámítógépek számítási teljesítménye a kevert állapotú qubitek számától függ, és a legfejlettebb prototípusok is körülbelül tíz bittel tudnak dolgozni. Egy tíz bites kvantumszámítógép

pedig nem használható túl sok mindenre, hiszen 2^{10} mindössze 1024. Egy hagyományos számítógépben egyszerű kombinálni a memóriabiteket és a logikai kapukat. Egy húszbites kvantumszámítógépet viszont nem lehet létrehozni pusztán két tízbites összekapcsolásával. A qubiteknek együtt kell kevert állapotban lenniük, ez a feladat pedig mindeddig megoldhatatlannak bizonyult.

A kulcskérdés az, milyen nehéz további qubitekkel bővíteni a rendszert. A kvantumszámítógép számítási teljesítménye exponenciálisan növekszik minden egyes hozzáadott qubittel, de ha az derül ki, hogy minden egyes qubit hozzáadása exponenciálisan nehezebbé teszi a mérnökök feladatát, akkor nem jutunk előre. (Azaz a kvantumszámítógép számítási teljesítménye csak egyenesen arányos lesz a tervezési nehézségekkel.) Általánosságban véve a további qubitek hozzáadására irányuló eddig felmerült módszerek jelentősen törekenyebbé tették a létrejövő rendszereket, és megnövelték az esélyét idő előtti dekoherenciájuknak.

Vannak ötletek a qubitek számának jelentős növelésére, bár a gyakorlatban még egyiket sem sikerült kivitelezni. Például Stephan Gulde és munkatársai az Innsbrucki Egyetemen egyetlen kalciumatom felhasználásával építettek egy kvantumszámítógépet, amely képes egyszerre több tucatnyi qubitet – talán százat is – kódolni, az atomon belüli különböző kvantumtulajdonságok felhasználásával.^[170] A kvantum-számítástechnika végső szerepét továbbra is homály fedi. Ám még ha kivitelezhetőnek is bizonyul egy több száz kevert qubitet tartalmazó kvantumszámítógép megalkotása, speciális célokra alkalmazható eszköz marad, bár a maga nemében más módszerekkel el nem érhető számítási teljesítménnyel fog rendelkezni.

Amikor a *The Age of Spiritual Machines* (A spirituális gépek kora) című könyvemben felvettem, hogy a molekuláris számítástechnika lesz a hatodik nagy számítástechnológiai paradigma, még sok vita övezte a gondolatot. Az elmúlt öt évben azonban olyan nagymértékű fejlődés történt, hogy a szakértők hozzáállása teljesen megváltozott, és most ez a mainstream álláspont. A háromdimenziós molekuláris számítástechnika összes előfeltétele túl van az elméletet igazoló vizsgálatokon: az egyetlen molekulából álló tranzistorok, az atomokra épülő memóriacellák, a nanovezetékek, módszerek a több billió (és potenciálisan több billiószor billió) alkatrész önösszeszerelésére és öndiagnosztizálására.

A jelenlegi elektronikai gyártás menete az aprólékos chiptervezéstől a fotolitográfiát követően a chipek nagy, központosított gyárakban való előállításáig tart. A nanoáramköröket ezzel szemben valószínűleg kis kémcsövekben fogják előállítani, mely fejlemény újabb fontos lépés lesz az ipari infrastruktúra decentralizálásában, és fenn fogja tartani a gyorsuló megtérülések törvényét ebben a században és még tovább is.

Az emberi agy számítási teljesítménye

„Talán elsietettnek tűnik a teljes mértékben intelligens gépek néhány évtizeden belüli megjelenésére számítani most, amikor a számítógépek fél évszázados fejlődés után még egy rovar szellemi szintjét is alig érték el. Emiatt sok régi mesterségesintelligencia-kutató gúnyosan fogadja a felvetést, és inkább néhány évszázadot tart reálisnak. Ám több ok is amellett szól, hogy a dolgok sokkal gyorsabban fognak zajlani a következő ötven évben, mint az előzőben... Az 1990-es évek óta az egyedi MI és robotikai programok számára rendelkezésre álló számítási teljesítmény évről évre megduplázódott: 1994-ben 30 MIPS volt, 1998-ban pedig 500 MIPS. Hirtelen szárba szökkentek azok a magok, amelyeket régen terméketlennek hittek. A gépek szövegeket

olvasnak, felismerik a beszédet, még egyik nyelvről a másikra is fordítanak. Robotok járkák a vidéket, araszolnak a Marson és gurulnak az irodák folyosóin. 1996-ban az EQP nevű tételbizonyító program öt hétig futott az Argonne Nemzeti Laboratórium 50 MIPS-es számítógépén, és megtalálta Herbert Robbins egyik Boole-algebrai sejtésének a bizonyítását, amit hatvan éven át hiába kerestek a tudósok. És még csak tavasz van. Mi lesz itt nyáron?”

(Hans Moravec,

When Will Computer Hardware Match the Human Brain?

[Mikor fogja utolérni a számítógép hardvere az emberi agyat?], 1997)

Mekkora az emberi agy számítási teljesítménye? Sok, az emberi teljesítményszinten már visszafejtett (azaz működésükben megértett) agyterület működésének lemásolására alapozó becslés született már erre vonatkozóan. Ha rendelkezésünkre áll egy becslés egy adott terület számítási teljesítményét illetően, akkor ezt a teljesítményt extrapolálhatjuk az egész agyra, tekintetbe véve, hogy az agy melyik részét képviseli a szóban forgó terület. Ezek a becslések a funkciók szimulálásán alapulnak, azaz nem egy adott terület összes idegsejtjét és a közöttük fennálló kapcsolatokat próbálják újraalkotni, hanem a terület általában vett funkcióját másolják le.

Noha önmagukban az egyes számításokra nem támaszkodhatunk, azt láthatjuk, hogy a különböző agyterületekre vonatkozó becslések összességében meglehetősen jó közelítő eredményt adnak az egész agy viszonylatában. A következőkben nagyságrendi becsléseket ismertetek, azaz a helyes értékek tízes számrendszerbeli nagyságrendjét igyekszem meghatározni. Az, hogy a különböző módszerekkel elvégzett, ugyanarra a területre vonatkozó becslések hasonló válaszokat adnak, alátámasztja a megközelítés helyességét, és azt jelzi, hogy a becslések a valós tartományba esnek.

Az az előrejelzés, hogy a szingularitás – az emberi intelligencia több billiószorosára való növekedése a nem biológiai intelligenciával való egybeolvadásnak köszönhetően – a következő néhány évtizedben be fog következni, nem függ ezeknek a becsléseknek a pontosságától. Még ha túl optimista is a becslésünk arról, hogy mekkora számítási teljesítmény kell az emberi agy szimulálásához (azaz túl alacsonyra becsüljük ezt az értéket), még ha ezerszer nagyobb is a valódi érték (amit nem hiszek), ez is csak körülbelül nyolc évvel késleltetné a szingularitást.^[171] Ha egymilliószor nagyobb a valódi érték, az körülbelül tizenöt évvel, ha pedig egymilliárdszor nagyobb, az körülbelül huszonegy évvel késleltetné a szingularitást.^[172]

Hans Moravec, a Carnegie Mellon Egyetem legendás robotikusa elemezte a retinában lévő képfeldolgozó idegsejthálózat által végrehajtott transzformációkat.^[173] A retina körülbelül két centiméter széles és fél milliméter vastag. A vastagságát kitevő idegsejtek nagy része a képek érzékelésével foglalkozik, az egyötödük azonban a képfeldolgozással, többek között a sötét és a világos területek megkülönböztetésével, illetve a mozgás érzékelésével a kép körülbelül egymillió kis részén.

Moravec elemzése szerint a retina másodpercenként tízmillió ilyen határvonal- és mozgásérzékelést végez el. A robotikus látórendszerekkel folytatott évtizedes kísérletei alapján úgy becsüli, hogy körülbelül száz számítógépes utasítást kell végrehajtani ahhoz, hogy az érzékelés az emberi szinten megtörténjen, ami azt jelenti, hogy a retina ezen része képfeldolgozó funkciójának a lemásolásához 1000 MIPS-re van szükség. Az emberi agy körülbelül 75 000-szer nehezebb, mint a retina ezen részében található 0,02 grammnyi idegsejt, s ez alapján az agy egészére vetítve a becslést, annak teljesítménye körülbelül 10^{14} (százbillió) utasítás másodpercenként.^[174]

Egy másik becslés Lloyd Watts és munkatársai munkájából ered, akik az emberi hallórendszer régióinak funkcionális szimulációjával foglalkoztak, amiről a 4. fejezetben fogok részletesebben írni.^[175] A Watts által kifejlesztett szoftver egyik funkciója az „adatfolyam-szétválasztás” nevű feladat volt, amit telekonferenciáknál és egyéb, a távjelenlét (egy telekonferencia résztvevőinek virtuális térbeli elhelyezése) megvalósításával kapcsolatos alkalmazásoknál használnak fel. Ennek eléréséhez, magyarázza Watts, „pontosan meg kell mérni két, egymástól térben bizonyos távolságra elhelyezkedő hangérzékelő között a jel időeltolódását”. A folyamat része a hangmagasság-elemzés, a térbeli pozicionálás és a beszédjellemzők érzékelése, ideértve a különböző nyelvek jellemzőit is. „Az egyik fontos jellemző, amit az emberek egy hangforrás helyének meghatározására használnak, az interaurális idődifferencia (*Interaural Time Difference, ITD*), vagyis az az időeltérés, amivel a hangok a két fülbe eljutnak.”^[176]

Watts kutatócsoportja az érintett agyi területek visszafejtése révén létrehozta azok funkcionálisan ekvivalens másait. Becslése szerint másodpercenként 10^{11} utasítás szükséges az emberi hangforrás-lokalizálás eléréséhez. Az ezért a folyamatért felelős agykérgi területek legalább az agyi idegsejtek 0,1 százalékát teszik ki. Ezzel tehát ismét csak a hozzávetőleg 10^{14} ($10^{11} \times 10^3$) utasítás per másodperchez jutunk el.

Egy másik becslés egy a Texasi Egyetemen elvégzett szimuláció alapján keletkezett, mely egy 10^4 idegsejtet tartalmazó kisagyi terület funkcionalitását másolta le. Ehhez 10^8 utasításra volt szükség másodpercenként, vagyis idegsejtenként körülbelül 10^4 utasításra. Ha ezt extrapoláljuk a becsült 10^{11} idegsejtekre, akkor hozzávetőlegesen másodpercenként 10^{15} utasítás végrehajtására van szükség a teljes agy esetében.

Az emberi agy visszafejtésének helyzetéről a későbbiekben fogok szólni, de az egyértelmű, hogy kisebb számítási kapacitással tudjuk lemásolni az egyes agyterületek funkcionalitását, mint ami ahhoz kell, hogy az egyes idegsejtek és az idegsejtek alkotóelemei (azaz az egyes idegsejteken belül zajló bonyolult kölcsönhatások) pontos nemlineáris működését szimuláljuk. Ugyanerre a következtetésre jutunk, amikor az egyes szervek funkcionalitását próbáljuk lemásolni. Például kísérleteznek olyan eszközökkel, amelyek az emberi hasnyálmirigy inzulinszint-szabályozó funkcióját szimulálják.^[177] Ezek az eszközök megméri a vér vércukorszintjét, majd ellenőrzött módon inzulint juttatnak a szervezetbe, hogy a megfelelő tartományban tartsák a vércukorszintet. Noha a biológiai hasnyálmirigyéhez hasonló módszert alkalmaznak, nem próbálják meg szimulálni az összes hasnyálmirigy-szigetsejt működését, és nincs is semmi ok rá, hogy ezt tegyék.

Ezek a becslések mind hasonló nagyságrendűek (másodpercenként 10^{14} utasítástól 10^{15} -ig). Tekintettel arra, hogy az emberi agy visszafejtése még milyen korai szakaszában van, a továbbiakban a még konzervatívabb, másodpercenkénti 10^{16} utasítással fogok számolni.

A mintafelismerés, az intellektus és az érzelmi intelligencia emberi képességeinek újraalkotásához elégséges az agy funkcionális szimulációja. Másfelől viszont, ha digitalizálni akarnánk egy adott ember személyiségét (azaz meg szeretnénk ragadni az összes tudását, ismeretét és a személyiségét – erről a 4. fejezet végén fogok részletesen írni), akkor a neurális folyamatokat az egyedi idegsejtek és idegsejtrészek – úgymint a sejttest, az axonok (kimenő kapcsolatok), dendritek (bejövő kapcsolatok) és szinapszisok (az axonokat és dendriteket összekapcsoló területek) – szintjén kell vizsgálni. Ehhez meg kell néznünk az egyes neuronok részletes modelljeit. Az idegsejtek közötti kapcsolatok számát idegsejtekként 10^3 -ra becsülik. A becsült 10^{11} neuronnal számolva ez körülbelül 10^{14} kapcsolatot jelent. Öt milliszekundumos kisülési idővel számolva körülbelül 10^{16} szinaptikus tranzakció történik másodpercenként.

A neuronmodell-szimulációk arra utalnak, hogy körülbelül 10^3 számításra van szükség szinaptikus tranzakciónként ahhoz, hogy megragadjuk a dendritek és egyéb idegsejtterületek nemlineáris működését (bonyolult kölcsönhatásait), azaz ezen a szinten körülbelül másodpercenként 10^{19} művelet végrehajtásával lehet szimulálni az emberi agy működését.^[178] Ezt tekinthetjük a felső határnak, a 10^{14} és a 10^{16} művelet másodpercenként pedig valószínűleg elegendő lehet az összes agyi terület funkcionális megfelelőjének eléréséhez.

Az IBM jelenleg megépítés alatt álló, és körülbelül e könyv eredeti megjelenésével egy időben elkészülő Blue Gene/L szuperszámítógépe^[6] a tervek szerint másodpercenként 360 billió ($3,6 \times 10^{14}$) számítást fog elvégezni.^[179] Ez a szám már most nagyobb, mint a fentebb ismertetett alacsonyabb becslés. A Blue Gene/L-nek azonban lesz még körülbelül száz terabyte (körülbelül 10^{15} bit) tárolókapacitása is, ami több, mint amennyi memória a becsléseink szerint az emberi agy funkcionális emulálásához szükséges (lásd lentebb). Korábbi előrejelzéseimmel összhangban, a szuperszámítógépek a következő évtized elején el fogják érni az emberi agy funkcionális emulálásához szükséges másodpercenkénti 10^{16} számítási teljesítményt, azaz a konzervatívabb becslésünket (lásd a *Növekedés a szuperszámítógépek teljesítményében* című fejezetben).

Az emberi szintű számítási kapacitás elérését célzó folyamatok felgyorsítása a személyi számítógépek terén. A mai személyi számítógépek számítási kapacitása meghaladja a másodpercenkénti 10^9 utasítást. Az előző fejezetben található, *A számítási kapacitás exponenciális növekedése a XX. és a XXI. században* című ábra előrejelzése szerint 2025-re elérjük a másodpercenkénti 10^{16} utasítást. Ugyanakkor ez az ütem sok módon gyorsítható. Az általános célú processzorok helyett használhatunk alkalmazásspecifikus integrált áramköröket (*application specific integrated circuits, ASIC*), amelyekkel az ismétlődő számítások esetében jobb ár–teljesítmény-arány érhető el. Az ilyen áramkörök már ma rendkívül magas számítási teljesítményt nyújtanak a számítógépes játékok mozgóképeinek előállításánál során alkalmazott ismétlődő számítások területén. Az ASIC-ek ezerszeresére javíthatják az ár–teljesítmény-arányt, körülbelül nyolc évvel előrébb hozva a korábban említett 2025-ös dátumot. A különböző részprogramok, melyekből az emberi agy szimulációja összeáll, szintén sok ismétlődő számítást fognak végrehajtani, s így alkalmasak lesznek az ASIC-eken való feldolgozásra. A kisagyban például ugyanaz az alapvető mintázat ismétlődik több milliárdszor.

Azzal is növelhetjük majd a személyi számítógépek teljesítményét, hogy felhasználjuk az internetre csatlakozó eszközök kihasználatlan számítási kapacitását. Az új kommunikációs paradigmák, mint a „mesh” hálózati számítások, minden hálózatra csatlakoztatott eszközt csomópontként kezelnek, nem pusztán „végpontként”.^[180] Más szóval, ahelyett, hogy az eszközök (például a személyi számítógépek és a PDA-k) pusztán információt küldenének a csomópontoknak és információt fogadnának azoktól, önmagukban is csomópontokként működnek, és minden más eszközzel információcserét folytatnának. Ezáltal egy nagyon robusztus, önszervező kommunikációs hálózat jönne létre. A számítógépek és a többi eszközök így könnyebben megcsapolhatnák a mesh rájuk eső régiójában lévő eszközök kihasználatlan CPU-ciklusait.

Jelenleg az internetre csatlakozó számítógépek teljes számítási kapacitásának a 99 százaléka, ha nem a 99,9 százaléka kihasználatlanul hever. Ha hatékonyan ki tudnánk használni ezt a kapacitást, azzal még százszorosára vagy ezerszeresére javíthatnánk az ár–teljesítmény-arányt. Ennélfogva nem alaptalan arra számítani, hogy az emberi agy számítási teljesítménye, legalábbis a hardver számítási teljesítménye viszonylatában, 2020 körül ezer dollárból előállítható lesz.

Az emberi szintű számítási teljesítmény elérése a személyi számítógépeknél azzal is tovább gyorsítható, ha a tranzistorokat eredeti „analóg” üzemmódjukban használjuk. Az emberi agyban számos folyamat nem digitális, hanem analóg. Noha a digitális számítógépekkel bármilyen kívánt pontossággal tudunk emulálni analóg folyamatokat, közben több nagyságrendnyi hatékonyságot veszítünk. Egy tranzistor képes összeszorozni két, analóg szintekkel reprezentált értéket; ha digitális áramkörökkel akarjuk elvégezni ugyanezt a műveletet, ahhoz több ezer tranzistor kell. Ennek a koncepciónak egyik úttörője Carver Mead a Kaliforniai Műszaki Egyetemen.^[181] Mead megközelítésének az egyik hátránya az, hogy egy ilyen natív analóg számítási rendszer megtervezése sokkal hosszadalmasabb, így az agy egyes régióit emuláló szoftvereket fejlesztő kutatók többsége általában a gyorsan módosítható szoftveres szimulációkat részesíti előnyben.

Az emberi memóriakapacitás. Hogyan hasonlítható össze a számítási teljesítmény az emberi memóriakapacitással? Látni fogjuk, hogy az emberi memóriakövetelményeket vizsgálva is hasonló időtartamot előrejelző becsléseket kapunk. Az egy szakértő által egy adott területen elsajátított „tudásdarabok” száma több terület esetében is hozzávetőlegesen 10^5 . Ezek a darabok lehetnek mintázatok (például arcok), illetve konkrét ismeretek. Például a világ legjobb sakkmeistereiről úgy tartják, hogy körülbelül 100 000 felállást ismernek. Shakespeare 29 000 szót használt a műveiben, de közel 100 000 különböző értelemben. Az orvosi szakértői rendszerek fejlesztése arra utal, hogy az emberek körülbelül 100 000 fogalmat tudnak elsajátítani egy területen. Ha úgy becsüljük, hogy ez a „szakmai” tudás csak 1 százalékát jelenti egy ember teljes mintázat- és ismerettárának, akkor összesen 10^7 tudásdarabbal kell számolnunk.

A saját tapasztalataim alapján, amelyeket olyan rendszerek tervezése során szereztem, melyek hasonló tudásdarabokat tárolnak (vagy szabályalapú szakértői rendszerekben, vagy önszervező mintázatfelismerő rendszerekben), a darabonkénti (mintázatonkénti vagy tudáselemenkénti) 10^6 bit megalapozott becslésnek tűnik, és ennek alapján az ember funkcionális memóriájának a teljes kapacitása körülbelül 10^{13} (tízbillió) bit lehet.

Az ITRS ütemterve szerint (lásd a RAM-ábrát az előző fejezetben) 2018 körül ezer dollárért fogunk tudni megvenni 10^{13} bit memóriát. Ne feledjük, hogy ez a memória az emberi agyban zajló elektrokémiai folyamatoknál több milliószor gyorsabb, és így sokkal hatékonyabb lesz!

Ha az emberi memóriát az egyes idegsejtkapcsolatok szintjén modellezzük, ismét csak magasabb értékű becslést kapunk. A kapcsolódási mintázatok és a neurotranszmitter anyagkoncentrációk tárolására kapcsolatonként körülbelül 10^4 bitet becsülhetünk. Ha a kapcsolatok számát 10^{14} -re becsüljük, akkor az eredmény 10^{18} (egymilliárdszor egymilliárd) bit.

A fenti elemzések alapján joggal feltételezhetjük, hogy 2020 körül elérhetővé válik, méghozzá körülbelül ezredolláros áron az a hardver, amely képes emulálni az emberi agy funkcionalitását. Ahogyan arra a 4. fejezetben kitérünk, a funkcionalitást lemásoló szoftverre további egy évtizedet kell majd várni. Mindazonáltal a hardver ár–teljesítmény-arányának, teljesítményének és sebességének az exponenciális javulása ez alatt az idő alatt is folytatódni fog, tehát 2030 körül már egy falunyi (körülbelül ezer) emberi agy kell majd ahhoz, hogy felérjen ezredollárnyi számítógéppel. 2050-re egy ezer dollárt érő számítógép számítási teljesítménye meg fogja haladni a Földön található összes emberi agyét. Ez persze csak azokra az agyakra vonatkozik, amelyek még csak biológiai idegsejteket használnak.

Noha az emberi idegsejtek csodálatos szerkezetek, számítógép-áramköröket nem szeretnénk (és nem fogunk) ugyanazokra a lassú módszerekre alapozva tervezni. A természetes kiválasztódás során

kialakult rendszerek minden zsenialitásuk ellenére több nagyságrenddel alulmaradnak azokkal szemben, amelyeket mi magunk meg tudunk tervezni. Ahogy visszafejlesztjük testünket és agyunkat, abba a helyzetbe kerülünk, hogy a természetes módon kialakult rendszereinknél sokkal tartósabb, ezerszer, milliószor gyorsabban működő hasonló rendszereket hozunk létre. Az elektronikai áramkörök már most több mint egymilliószor gyorsabbak, mint az idegsejtek közötti elektrokémiai folyamatok, és ez a sebesség csak nőni fog.

Az emberi idegsejtek összetettségének nagy része a létfenntartó funkciók biztosítására szolgál, nem pedig az információfeldolgozó képességeikére. Egyszer majd képesek leszünk áthelyezni a tudati folyamatainkat egy alkalmasabb számítási közegbe. És akkor a tudatunknak nem kell majd ilyen kicsinek maradnia.

A számítógép-használat korlátai

„Ha egy nagyon hatékony superszámítógép egész nap egy időjárás-szimulációs probléma kiszámításán dolgozik, a fizika törvényei szerint mennyi az a minimális mennyiségű energia, ami kárba vész? A választ igazából nagyon könnyű kiszámolni, mivel semmi köze nincs a számítások mennyiségéhez. A válasz ugyanis mindig nulla.”

(Edward Fredkin, fizikus [\[182\]](#))

Már volt öt paradigmánk (az elektromechanikus számológépek, a reléalapú számítógépek, az elektroncsövek, a diszkrét tranzistorok és az integrált áramkörök), amelyeknek köszönhetően a számítókapacitás és annak ár–teljesítmény-aránya is exponenciálisan növekedhetett. Mindahányszor az egyik paradigma elérte a határait, a következő lépett a helyébe. Már látjuk a hatodik paradigma körvonalait, ami elviszi a számítástechnikát a háromdimenziós molekuláris tartományba. Mivel a számítástechnika lassan mindent meghatároz, ami fontos nekünk, a gazdaságtól az emberi intellektusig és kreativitásig, joggal merül fel a kérdés: vannak az anyag és az energia számítási lehetőségeinek végső határai? Ha igen, mik ezek a határok, és mikor fogjuk elérni őket?

Az emberi intelligencia olyan számítási folyamatokon alapul, amelyeket egyre jobban kezdünk megérteni. Végül az emberi intelligencia módszereit alkalmazva és kiterjesztve, a nem biológiai alapú számítás sokkal nagyobb teljesítményét kihasználva meg fogjuk sokszorozni intellektuális képességeinket. A számítástechnika végső határait rákérdezni tehát annyi, mint azt a kérdést feltenni, hogy mi a sorsa a civilizációnknak.

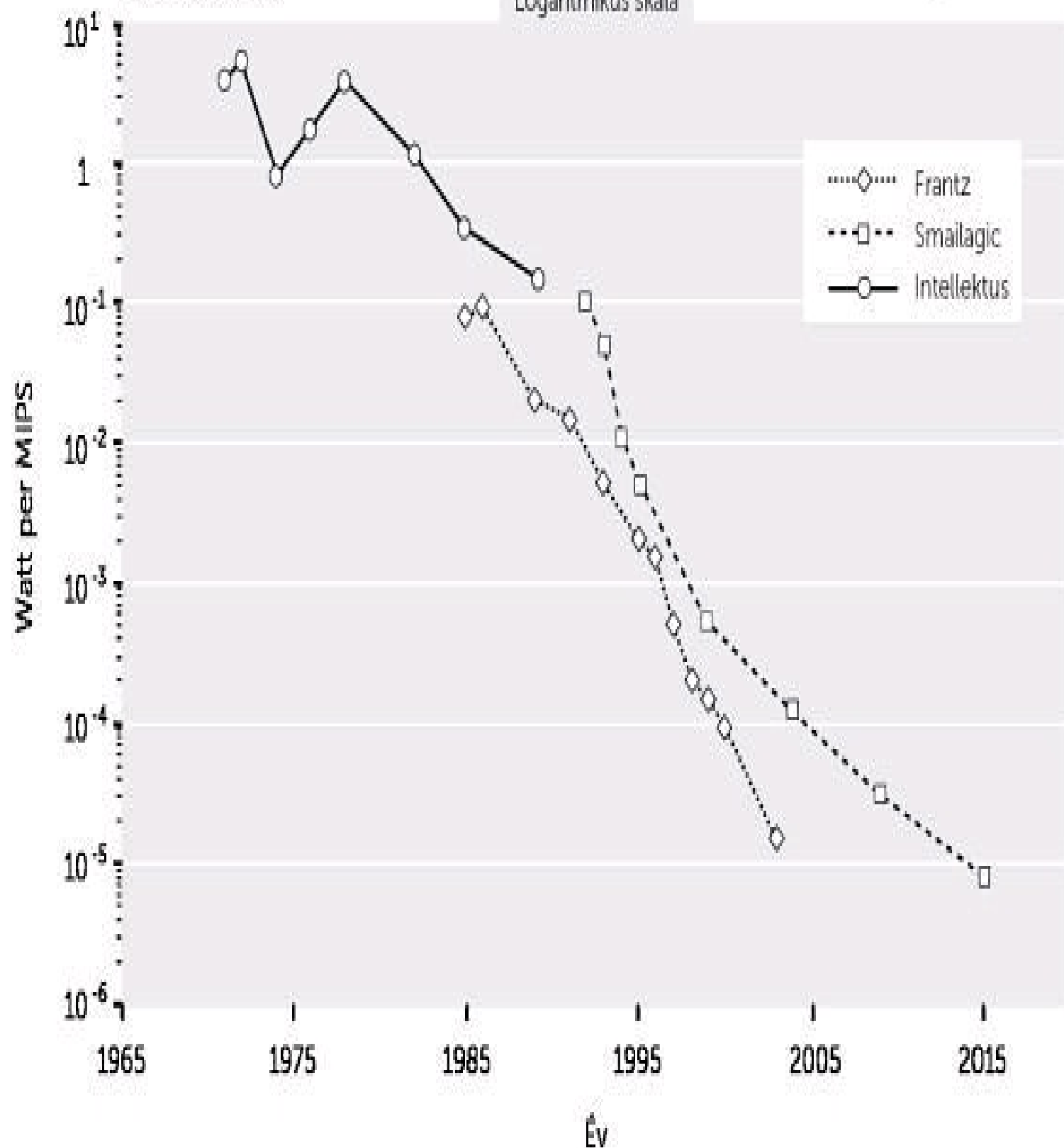
Az ebben a könyvben bemutatott elméletekkel szemben gyakran hozzák fel azt az ellenvetést, hogy ezek az exponenciális trendek előbb-utóbb el kell, hogy érjék a határukat, ahogy az általában az exponenciális trendekkel történni szokott. Amikor egy faj új élőhelyre kerül, amire a híres példa az üregi nyulak Ausztráliába telepítése, az egyedszáma egy ideig exponenciálisan nő, ám végül eléri a környezet teherbíró képességének a határát. Bizonyára az információfeldolgozásnak is vannak hasonló határai. Valóban, a számítási teljesítménynek is határt szabnak a fizikai törvények, de addig még lehetővé teszik az exponenciális növekedés folytatódását, amíg a nem biológiai intelligencia billiószor billiószor erősebbé válik a mai teljes emberi civilizációnál, a jelenlegi számítógépeket is beleértve.

A számítási teljesítmény határainak mérlegelésénél fontos tényező az energiafelhasználás. Az egy MIPS-re vetített energiafogyasztás exponenciális ütemben csökken, ahogyan az a következő ábrán is látható. [\[183\]](#)

Az egy MIPS-re eső energiafogyasztás csökkenése



Logaritmikus skála



Ugyanakkor azt is tudjuk, hogy a számítógépek MIPS-e időközben exponenciálisan növekedett. Az, hogy az energiafogyasztás javulása mennyire tart lépést a processzorok sebességével, attól függ, mennyire használjuk ki a párhuzamos feldolgozás előnyeit. Több kisebb teljesítményű számítógép eredendően alacsonyabb hőmérsékleten üzemel, hiszen a számítások nagyobb felületen oszlanak meg. A processzorsebesség függ a feszültségtől, és az igényelt energia négyzetesen arányos a feszültséggel. Tehát egy alacsonyabb órajelen működő processzor jelentősen csökkenti az energiafogyasztást. Ha a gyorsabb, önálló processzorok helyett a párhuzamos feldolgozást fejlesztjük, akkor az energiafogyasztás és a hőkibocsátás javulása lépést tarthat az egy dollárra eső MIPS-szel, ahogyan az *Az egy MIPS-re eső energiafogyasztás csökkenése* című ábrán látható.

Ez lényegében ugyanaz a megoldás, mint amit a biológiai evolúció is kifejlesztett az állati agyak esetében. Az emberi agyak körülbelül százbillió számítógépet (idegsejtek közötti kapcsolatot, ahol az információfeldolgozás nagy része történik) használ, ám ezeknek a processzoroknak nagyon alacsony a számítási teljesítménye, és így viszonylag keveset fogyasztanak.

Az Intel egészen a közelmúltig az egyre gyorsabb, egyre több hőt leadó egymagos processzorok fejlesztésére fektette a hangsúlyt, újabban viszont fokozatosan a párhuzamosítás irányába mozdult el, és több processzormagot helyez el egy chipen. Látni fogjuk, hogy a chiptechnológia ebbe az irányba mozdul el, hogy kordában tartsa az energiafogyasztást és a hőkibocsátást.^[184]

Reverzibilis számítások. Végző soron a számítások masszívan párhuzamos folyamatokba szervezése, ahogy az emberi agy is teszi, önmagában nem lesz elég az energiafogyasztás és az annak következtében fellépő hőveszteség elfogadható szinten való tartására. A jelenlegi számítógépes paradigma az úgynevezett irreverzibilis számítástechnikán alapul, ami azt jelenti, hogy elméletileg nem tudjuk visszafelé futtatni a szoftvereket. A bemeneti adatok egy program futásának minden lépésénél elvesznek – törlődnek –, és az adott számítás eredményei kerülnek tovább a következő lépésre. A programok általában nem őrzik meg a részeredményeket, mivel ez feleslegesen kötne le túl nagy mennyiségű memóriát. A bemeneti információk szelektív törlése különösen a mintázatfelismerő rendszerekre igaz. Például a látórendszerek, legyenek bár emberiek vagy gépiek, nagyon nagy mennyiségű bemeneti adatot kapnak (a szemekből vagy a vizuális érzékelőkből), mégis viszonylag tömör kimenetet hoznak létre (például a felismert mintázatok azonosítását). Az adatok törlésének aktusa hőt termel, és így energiát fogyaszt. Amikor törlődik egy bit információ, annak az információnak lennie kell valahol. A termodinamika törvényei szerint a törölt bit lényegében kikerül a közvetlen környezetbe, s így növeli annak entrópiáját, amit egy adott környezet információtartalmára jellemző értéknek is lehet tekinteni (beleértve a látszólag rendezetlen információt is). Ennek következtében a környezet hőmérséklete megnő (mivel a hőmérséklet az entrópia függvénye).

Másfelől, ha nem töröljük az algoritmus minden egyes lépéséhez tartozó bemenetének minden egyes információbitjét, hanem csak áthelyezzük máshova, akkor ezek a bitek a számítógépben maradnak, és nem kerülnek ki a környezetbe – így hőt sem termelnek, illetve nem igényelnek külső energiabevitelt sem.

Rolf Landauer 1961-ben kimutatta, hogy a reverzibilis logikai műveletek, mint a NOT (amely az ellentétére vált át egy bitet) végrehajthatók anélkül, hogy energiát kellene közölni vagy hő keletkezne, az irreverzibilis logikai műveletek viszont, mint az AND (mely akkor és csak akkor ad 1 értéket a C bitnek, ha az A és a B bemeneti bit értéke is 1), energiát igényelnek.^[185] 1973-ban Charles Bennett bebizonyította, hogy bármilyen számítás elvégezhető kizárólag reverzibilis logikai műveletekkel.^[186] Egy évtizeddel később Ed Fredkin és Tommaso Toffoli bemutatta a reverzibilis

számítástechnika elméletének átfogó áttekintését. ^[187] Az alapelv az, hogy ha megtartjuk az összes részeredményt, majd a számítás elvégzése után visszafelé hajtjuk végre az algoritmust, akkor oda jutunk, ahonnan elindultunk, energiafelhasználás és hőtermelés nélkül. Közben azonban kiszámítottuk az algoritmus eredményét.

Milyen okos egy szikla? Ahhoz, hogy értékeljük az energiafogyasztás és hőkibocsátás nélküli számítástechnika kivitelezhetőségét, gondoljuk azt, hogy a számításra egy hétköznapi sziklában kerül sor. Noha úgy tűnhet, hogy egy sziklán belül nem sok minden történik, a hozzávetőleg 10^{25} (tízbilliószor billió) atom egy kilogramm anyagban valójában rendkívül aktív. A szikla látszólagos szilárdsága ellenére az összes atom mozgásban van, elektronokat cserél, megváltoztatja a részecskék spinjét, és gyorsan mozgó elektromágneses mezőket hoz létre. Mindez az aktivitás számításokat jelképez, még ha nem is túl értelmesen szervezett számításokat.

Már megmutattuk, hogy az atomok képesek egy bit per atomnál nagyobb sűrűségben információt tárolni, például a nukleáris mágneses rezonanciára épülő számítástechnikai eszközökben. Az Oklahomai Egyetem kutatói 1024 bitet tároltak egy tizenkilenc hidrogénatomból álló molekula protonjainak a mágneses kölcsönhatásaiban. ^[188] Így a szikla állapota bármelyik adott pillanatban legalább 10^{27} (ezerbilliószor billió) bit memóriát képvisel.

A számítások szempontjából, csak az elektromágneses kölcsönhatásokat tekintve, másodpercenként legalább 10^{15} bitállapot-változás történik egy 1 kg tömegű sziklában, ami gyakorlatilag másodpercenként 10^{42} (egymilliószor billiószor billiószor billió) műveletnek felel meg. A sziklának mégisincs szüksége energiára, és nem termel mérhető mennyiségű hőt.

Természetesen az atomi szintű lázas tevékenység ellenére a szikla semmilyen hasznos munkát nem végez (hacsak nem mint papírnehezék vagy dekoráció). Ennek az az oka, hogy az atomok struktúrája a sziklában túlnyomórészt gyakorlatilag véletlenszerű. Másfelől viszont ha céltudatosabban szerveznénk meg a részecskéket, lenne egy hideg, nulla energiafogyasztású számítógépünk, körülbelül 10^{27} bit memóriával és másodpercenkénti 10^{42} műveletfeldolgozási teljesítménnyel, ami körülbelül tízbilliószor nagyobb, mint a Földön létező összes emberi agy teljesítménye, még ha a legkonzervatívabb (legmagasabb) 10^{19} művelet per másodperc számítási teljesítményt is tulajdonítjuk az utóbbiaknak. ^[189]

Ed Fredkin bebizonyította, hogy még az sem szükséges, hogy az eredmény megszerzése után visszafelé végrehajtsuk az algoritmust. ^[190] Fredkin több olyan reverzibilis logikai kapuból álló elrendezést mutatott be, amelyek a számítások elvégzése közben már el is végzik a megfordítást, és amelyek univerzálisak, azaz általános célú számítógépek építhetők belőlük. ^[191] Fredkin ezután megmutatja, hogy a reverzibilis logikai kapukból felépített számítógépek hatékonysága nagyon, legalább 99 százalékban megközelítheti az irreverzibilis kapukból építettekét. Ezt írja:

„Lehetséges [...] implementálni [...] olyan hagyományos számítógépeket, amelyek csak abban különböznek a jelenlegiektől, hogy az alapvető alkatrészeik mikroszkopikus szinten reverzibilisek. Ez azt jelenti, hogy a számítógép makroszkopikus működése szintén reverzibilis. Ennek okán pedig feltehetjük [...] a kérdést [...] »Mi kell ahhoz, hogy egy számítógép maximálisan hatékony legyen?« A válasz az, hogy ha egy számítógép mikroszkopikus szinten reverzibilis alkatrészekből épül fel, akkor tökéletesen hatékony lehet. Mennyi energiát kell egy tökéletesen hatékony számítógépnek elhasználnia ahhoz, hogy kiszámítson valamit? A válasz az, hogy egy ilyen

A reverzibilis logikát már bemutatták, és valóban csökkenti az energiafelvételt és a hőtermelést.^[193] Fredkin reverzibilis logikai kapui választ adnak a reverzibilis számítástechnika elméletének egyik legfontosabb problémájára: arra, hogy más stílusú programozást igényelne. Fredkin érvelése szerint képesek vagyunk közönséges logikai áramköröket és memóriát építeni kizárólag reverzibilis logikai kapukból, és így továbbra is alkalmazhatjuk a létező, hagyományos szoftverfejlesztési módszereket.

Nehéz eléggé hangsúlyozni ennek a meglátásnak a jelentőségét. A szingularitással kapcsolatban az egyik kulcsfontosságú megállapítás az, hogy végső soron minden fontos dolgot az információfeldolgozás – a számítástechnika – fog mozgatni. A fentiek fényében pedig a jövő technológiájának elsődleges alapja nem fog energiát igényelni.

A gyakorlati valóság valamivel bonyolultabb. Ha valóban meg akarjuk ismerni egy számítás eredményeit – azaz kimenetet várunk egy számítógéptől –, akkor a válasz lemásolásának és a számítógépből való kijuttatásának a folyamata irreverzibilis folyamat, és minden egyes kijuttatott bit hőt fog termelni. Ugyanakkor a legtöbb fontos alkalmazás esetében az algoritmus végrehajtására fordított energia jóval meghaladja a végeredmények kommunikálásához szükségeset, tehát az utóbbi nem fogja számottevően megváltoztatni az energiaegyenleget.

Mindazonáltal a lényegében véletlenszerű hő- és kvantumhatások miatt a logikai műveleteknek van egy eredendő hibaszázaléka. Hibakereső és -javító kódokkal kiiktathatjuk a hibákat, de egy bit kijavítása nem reverzibilis művelet, tehát energiát igényel és hőt termel. A hibák aránya alapvetően kicsi, de ha akár csak, mondjuk, minden 10^{10} műveletből egy hibás, akkor is mindössze 10^{10} nagyságrenddel sikerült csökkentenünk az energiafogyasztást, nem pedig teljesen megszüntettük azt.

A számítástechnika korlátainak vizsgálata során a hibaarány problémája fontos tervezési kérdéssé válik. A számítási teljesítmény növelésének bizonyos módszerei, például a részecskék rezgési frekvenciájának növelése egyben a hibaarányokat is növeli, és így természetes határt szab az anyag és energia felhasználásával végzett számítások kapacitásának.

Egy másik fontos trend, amelynek a téma szempontjából jelentősége van, az, hogy a hagyományos akkumulátorok felől elmozdulás történt a parányi energiacellák felé (ezek olyan eszközök, amelyek kémiai formában tárolják az energiát, például hidrogénként, amely aztán egyesül a rendelkezésre álló oxigénnel). Energiacellákat már most építenek a MEMS- (mikroelektronikai mechanikus rendszerek) technológia felhasználásával.^[194] A nanoszintű jellemzőkkel bíró háromdimenziós molekuláris számítógépek felé közeledve az erősen párhuzamos processzorok alkotta számítási közegben elosztva jelennek majd meg a nano-energiacellák mint energiaforrások. A jövőbeli, nanotechnológia alapú energiatechnológiákat az 5. fejezetben fogjuk tárgyalni.

A nanoszámítások korlátai. A számítógépek végső határai még az eddig tárgyalt korlátokkal együtt is igen távoliak. Hans Bremermann, a Kaliforniai Egyetem professzora és Robert Freitas nanotechnológia-teoretikus munkájára alapozva Seth Lloyd, az MIT professzora megbecsülte egy 1 kilogramm súlyú, egy liter térfogatú – azaz egy kisebb laptop nagyságú – hordozható számítógép, az ő elnevezésében „a tökéletes laptop” maximális számítási teljesítményét a fizika jelenleg ismert törvényeinek fényében.^[195] A potenciális számítási teljesítmény a rendelkezésre álló energia függvényében növekszik. Az energia és a számítási teljesítmény közötti kapcsolatot a

következőképpen érthetjük meg: egy adott mennyiségű anyagban lévő energia az egyes atomokhoz (és szubatomi részecskékhez) tartozó energia, tehát minél több az atom, annál több az energia. Amint azt fentebb tárgyaltuk, potenciálisan minden atom felhasználható a számításokhoz, tehát minél több az atom, annál több a számítás. Minden egyes atom vagy részecske energiája annál nagyobb, minél nagyobb a mozgása frekvenciája: több mozgás, több energia. Ugyanez az összefüggés áll fenn a potenciális számítási teljesítménynél is: minél nagyobb a mozgás frekvenciája, annál több számítást tudnak elvégezni az egyes elemek (amik akár atomok is lehetnek). (Ezt láthatjuk a mai chipekben is: minél nagyobb az órajelük, annál nagyobb a számítási sebességük.)

Tehát egy tárgy energiája és a számítások végzésére való potenciálja között egyenes arányosság áll fenn. Egy kilogramm anyag nagyon sok energiát képvisel, ahogyan azt Einstein híres egyenletéből – $E = mc^2$ – tudjuk. A fénysebesség négyzete nagyon nagy szám: hozzávetőlegesen 10^{17} méter²/szekundum². Az anyag számítási potenciáljának meghatározásában egy nagyon kis szám, a Planck-állandó is szerepel: $6,6 \times 10^{-34}$ joule-szekundum (a joule az energia mértékegysége). Ez a legkisebb nagyságrend, amiben számításra fordíthatjuk az energiát. Egy tárgy számítási kapacitásának elméleti határát úgy határozhatjuk meg, hogy elosztjuk a teljes energiáját (minden egyes atom vagy részecske energiája megszorozva az atomok vagy részecskék számával) a Planck-állandóval.

Lloyd kimutatja, hogy egy kilogramm anyag potenciális számítási teljesítménye egyenlő az energia és a π szorzatának és a Planck-állandónak a hányadosával. Mivel az energia rendkívül nagy szám, a Planck-állandó pedig igen kicsi, az egyenlet eredménye rendkívül nagy érték lesz: körülbelül 5×10^{50} művelet másodpercenként. [\[196\]](#)

Ha összehasonlítjuk ezt a számot az összes emberi agy képviselte számítási teljesítményre tett legkonzervatívabb becsléssel (10^{19} művelet másodpercenként és 10^{10} ember), akkor azt látjuk, hogy körülbelül ötmilliárdszor billió emberi civilizációnak felel meg. [\[197\]](#) Ha a 10^{16} becslést használjuk, ami szerintem elég az emberi intelligencia funkcionális emulálásához, akkor a tökéletes laptop ötbilliószer billió emberi civilizációénak megfelelő agyi kapacitással működne. [\[198\]](#) Ez a laptop egyetlen nanoszekundum egy tízezred része alatt el tudna végezni az elmúlt tízezer év összes emberi gondolkodásának megfelelő gondolkodást (azaz tízmilliárd emberi agy tízezer éven keresztül végzett munkáját). [\[199\]](#)

Persze van néhány kitétel is. Az egy kilogrammos laptopunk teljes tömegének energiává változtatása lényegében ugyanaz, mint ami egy termonukleáris robbanás során történik. Természetesen nem azt akarjuk, hogy a laptop felrobbanjon, hanem azt, hogy megtartsa egy literes térfogatát. Tehát, finoman fogalmazva, gondosan kell csomagolnunk. Egy ilyen eszköz maximális entrópiájának (az összes részecske állapota által képviselt szabadsági fokának) elemzése révén Lloyd kimutatta, hogy egy ilyen számítógépnek elméletileg 10^{31} bit lenne a memóriakapacitása. Nehéz elképzelni azokat a technológiákat, amelyekkel elérhető lenne ez a határ, azokat viszont könnyű, amelyek megközelíthetnék. Ahogyan az Oklahomai Egyetem projektjéből kiderült, már bebizonyítottuk, hogy képesek vagyunk legalább ötven bit információt tárolni egyetlen atomban (bár mindeddig egyszerre csak néhány atomban sikerült). Így tehát végül megvalósíthatónak kell lennie 10^{27} bit memória egy kilogramm anyag 10^{25} atomjában való tárolásának is.

Ám mivel minden egyes atom több jellemzője is felhasználható információtárolásra – például a pontos elhelyezkedése, a spinje, és az összes részecskéinek kvantumállapota – valószínűleg a 10^{27} bitnél jobb eredményt is elérhetünk. Anders Sandberg neurobiológus becslése szerint egy hidrogénatom potenciális tárolókapacitása körülbelül négymillió bit. Ezt a sűrűséget azonban még nem sikerült bizonyítani, ezért konzervatívabb becslést fogunk használni. [\[200\]](#) Ahogy fentebb említettük, másodpercenként 10^{42} számításnak kell elérhetőnek lennie jelentős hőtermelés nélkül. A reverzibilis

számítási technológiák teljes kibontakozása révén, alacsony hibaarányú rendszereket használva, és megengedve bizonyos ésszerű mértékű energiaveszteséget, valahol a másodpercenkénti 10^{42} és 10^{50} közötti számításhoz kell eljutnunk.

A két határérték közötti terület gyakorlati szempontból elég összetett. Azoknak a technikai problémáknak a vizsgálata, amelyek a 10^{42} -től a 10^{50} -ig való eljutás során felmerülhetnek, kívül esik ennek a fejezetnek a fókuszán. Mindazonáltal tartsuk észben, hogy nem rögtön a kitűzött 10^{50} -ból kiindulva fogunk különböző gyakorlati megfontolások alapján visszafelé okoskodni, tervezni. Az új technológiák fokozatosan jelennek majd meg, mindig a legújabb vívmányt felhasználva fognak előrelépni a következő szintre. Tehát amint eljutunk a másodpercenkénti (és egy kilogrammonkénti) 10^{42} művelet civilizációjához, az akkori tudósok és mérnökök arra fogják használni hatalmas nem biológiai intelligenciájukat, hogy rájöjjenek, hogyan ériék el a 10^{43} -t, majd a 10^{44} -t és így tovább. Én arra számítok, hogy nagyon közel fogunk kerülni a végső határokhoz.

Egy 1 kilogrammos „tökéletes laptop” még 10^{42} másodpercenkénti műveletnél is képes lenne tíz mikroszekundum alatt végrehajtani az elmúlt tízezer év összes emberi gondolkodásának megfelelőjét (tízmilliárd emberi agyat feltételezve a tízezer évre).^[201] Ha megnézzük az előző fejezetben *A számítási kapacitás exponenciális növekedése a XX. és a XXI. században* című ábrát, akkor láthatjuk, hogy ekkora számítási teljesítményt 2080 körül már ezer dollárért meg fogunk tudni venni.

Az erősen párhuzamos, reverzibilis számítógép egy konzervatívabb, ám igen meggyőző terve Eric Drexler szabadalmaztatott, teljes mértékben mechanikus nanoszámitógépe.^[202] A számításokat gyakorlatilag rugók által mozgatott nanoméretű rudak végzik. A részeredményeket tároló rudak minden számítás után visszatérnek az eredeti helyzetükbe, így valósítva meg a fordított számítást. Az eszköznek egybillió (10^{12}) processzora van, és összességében másodpercenként 10^{21} művelet a számítási teljesítménye – így egy köbcentiméteres kiterjedésben százezer emberi agy teljesítményét képes szimulálni.

A szingularitás dátumának kitűzése. Egy szerényebb, de így is jelentős küszöböt sokkal korábban el fogunk érni. A 2030-as évek elején ezer dollárért körülbelül 10^{17} másodpercenkénti műveleti kapacitást képviselő számítástechnikai eszközt lehet majd kapni (az ASIC és az internetes megosztott számítások előnyeit kihasználva valószínűleg inkább 10^{20} -t). Ma több mint 10^{11} dollárt (százmilliárd dollárt) költünk évente számítástechnikára, ami 2030-ra óvatos becslések szerint is évi 10^{12} dollárra (egybillió dollárra) fog növekedni. A 2030-as évek elején tehát évente 10^{26} – 10^{29} másodpercenkénti műveleti kapacitást képviselő eszközt fogunk legyártani nem biológiai számítási eszközök formájában. Ez nagyjából annyi, mint amennyit az összes élő ember együttes biológiai intelligenciája számítási teljesítményének becsültünk.

De ha még éppen csak egyenlő is az agyaink összteljesítményével, intelligenciánknak ez a nem biológiai része sokkal erősebb lesz, mert egyesíteni fogja magában az emberi intelligencia mintázatfelismerő képességét, valamint a gépek memória- és ismeretmegosztási lehetőségeit, illetve memóriájuk pontosságát. Ez a nem biológiai rész mindig csúcsteljesítményen fog működni, amit a biológiai emberiségről nem lehet elmondani; a biológiai emberi civilizáció által képviselt másodpercenkénti 10^{26} műveleti kapacitás kihasználtsága nagyon csekély.

A számítástechnika helyzete a 2030-as évek elején nem a szingularitást fogja jelenteni, mivel még nem fog megtörténni intelligenciánk radikális kibővülése. Azonban a 2040-es évek közepére ezer dollár értékű számítási kapacitás már másodpercenként 10^{26} műveletet fog jelenteni, tehát az évente (körülbelül 10^{12} dollár összköltséggel) létrehozott intelligencia nagyjából egymilliárdszor lesz erősebb, mint az emberiség mai összintelligenciája.^[203]

Ez valóban gyökeres változást fog jelenteni, és ezért az emberi képességekben mélyreható és drámai hirtelenségű változást eredményező szingularitás dátumát 2045-re teszem.

Annak ellenére, hogy a 2040-es évek közepére egyértelművé válik a nem biológiai intelligencia túlsúlya, a civilizációnk továbbra is emberi marad. A biológiát meg fogjuk haladni, emberi mivoltunkat azonban nem. Erre a problémára a 7. fejezetben térek vissza.

Visszatérve a számítástechnika fizikai törvények általi korlátaival, a fenti becslések laptop méretű számítógépek figyelembevételével készültek, mivel ez ma egy ismerős forma. Ennek az évszázadnak a második évtizedére viszont a legtöbb számítástechnikai eszköz nem ilyen téglatest alakú tárgy lesz, hanem el lesz osztva a környezetünkben. A számítástechnika mindenhol ott lesz: a falakban, a bútorainkban, a ruháinkban, a testünkben és az agyunkban.

És természetesen az emberi civilizáció nem lesz arra korlátozva, hogy mindössze néhány kilogrammnyi anyaggal végezzen számításokat. A 6. fejezetben meg fogjuk vizsgálni egy Föld méretű bolygó számítási potenciálját, illetve a naprendszerek, a galaxisok és a teljes ismert világegyetem nagyságrendjével összemérhető számítógépeket. Ahogyan azt látni fogjuk, az az idő, amire az emberi civilizációnak szüksége van a bolygónkon túlra, a világegyetembe kiterjedő számítástechnika – és intelligencia – nagyságrendjének eléréséhez, sokkal rövidebb lehet, mint hinnénk.

Memóriahatékonyság és számítási hatékonyság: egy szikla szemben egy emberi aggyal. Az anyag és energia számítási korlátait szem előtt tartva egy tárgy két praktikus mércéje a memóriahatékonyság és a számítási hatékonyság. Ezeket úgy határozhatjuk meg, mint egy tárgy azon memóriahányadát, illetve a benne zajló számítások azon hányadát, amelyek valóban hasznosak. Emellett tekintetbe kell vennünk az *ekvivalenciaelvet* is: még ha egy számítás hasznos is, amennyiben egy egyszerűbb módszer ekvivalens eredményeket hoz, akkor a számítást az egyszerűbb algoritmussal kell elvégeznünk. Más szóval, ha két módszer ugyanazt az eredményt adja, de az egyik több számítást használ, mint a másik, akkor a számításigényesebb módszert is úgy kell tekinteni, mint ami csak annyi számítást használ, amennyit a kevésbé számításigényes módszer.^[204]

Ezeknek az összehasonlításoknak az a célja, hogy felmérjük, milyen messzire tudott eljutni a biológiai evolúció az intelligenciával gyakorlatilag nem rendelkező rendszerektől (például egy közönséges sziklától, ami nem végez *hasznosszámításokat*) az anyag azon végső képességéig, hogy hasznos számításokat végezzen el. A biológiai evolúció elvitt minket az út egy szakaszán, a technológiai evolúció (mely, ahogyan arra korábban már rámutattam, a biológiai evolúció folytatása) el fog minket vinni a határok közelébe.

Emlékezzünk vissza, hogy egy 1 kilogrammos szikla 10^{27} bit nagyságrendű információt tartalmaz atomjai állapotában kódolva, a részecskéi aktivitása pedig körülbelül másodpercenként 10^{42} műveletet jelent! Mivel egy közönséges kódarabról beszélünk, talán kicsit önkényesen, de azt fogom feltételezni, hogy a felszíne körülbelül ezer bit tárolására képes – ez egy elég visszafogott becslés.^[205] Ez a teljes szikla elméleti kapacitásának 10^{-24} részét jelenti, vagyis a szikla

memória hatékonysága 10^{-24} .^[206]

A sziklát számítások végzésére is használhatjuk. Ha például leejtjük egy bizonyos magasságból, ki tudjuk számolni, mennyi idő alatt esik le egy tárgy abból a magasságból. Ez természetesen nagyon kevés számítást jelent: mondjuk egy műveletet másodpercenként, azaz a szikla számítási hatékonysága 10^{-42} .^[207]

Ezzel szemben mit tudunk elmondani az emberi agy hatékonyságáról? Fentebb kitértünk arra, hogy egy idegsejtkapcsolat körülbelül 10^4 bitet képes tárolni a neurotranszmitter koncentrációiban, valamint az axon- és dendritnyúlványokban (specifikus alakzatokban). A mintegy 10^{14} idegsejtkapcsolat tehát összesen 10^{18} bitet képvisel. Az emberi agy súlya hozzávetőlegesen ugyanannyi, mint a szóban forgó szikláé (illetve közelebb van a másfél kilogrammhoz, mint az egyhez, de mivel nagyságrendekről beszélünk, az eltérés nem lényeges). Melegebb, mint egy hideg szikla, de így is használhatjuk ugyanazt a 10^{27} bit becsült értéket az elméleti memóriakapacitására (azon becslés alapján, hogy minden egyes atomban egy bitet tudunk tárolni). Ezek szerint az agy memória hatékonysága 10^{-9} .

Az ekvivalenciaelv miatt azonban nem használhatjuk fel az agy nem hatékony kódolási módszereit arra, hogy meghatározzuk a memória hatékonyságát. A funkcionális memória vonatkozásában korábban tett 10^{13} bit becslésünket használva 10^{-14} a memória hatékonyság. Ez logaritmikus skálán vizsgálva körülbelül félúton van a szikla és a tökéletesen hideg laptop között. Mindazonáltal, noha a technológia exponenciálisan fejlődik, a tapasztalatainkat lineáris világban szerezzük, és egy lineáris skálán az emberi agy valójában közelebb van a sziklához, mint a tökéletesen hideg számítógéphez.

Végül az utolsó kérdés: mekkora az agy számítási hatékonysága? Ismét csak tekintetbe kell vennünk az ekvivalenciaelvet, és az agy funkcionalitásának emulálásához szükséges másodpercenként 10^{16} művelet becsült értéket kell használnunk, nem pedig a magasabb becslést (másodpercenként 10^{19} műveletet), ami az minden egyes idegsejt összes részletének emulálásához kell. Az agy atomjainak másodpercenkénti 10^{42} művelet becsült elméleti számítási kapacitását figyelembe véve a számítási hatékonyság 10^{-26} lesz. Megint csak közelebb vagyunk a sziklához, mint a laptophoz, még a logaritmikus skálán is.

A memória- és számítási hatékonyság szempontjából agyunk jóval fejlettebb az olyan prebiológiai tárgyaknál, mint a sziklák. Azonban nyilvánvaló, hogy több nagyságrendi fejlődés áll még előttünk ennek az évszázadnak az első felében.

A végső határon túl: piko- és femtotechnológia, valamint a fénysebesség meghaladása. A fentebb megállapított másodpercenkénti 10^{42} művelet, mint az egy kilogrammos, egy liter térfogatú hideg számítógép korlátja, és a másodpercenkénti 10^{50} művelet, mint egy (nagyon) meleg számítógép korlátja, az atomokkal végzett számításokon alapul. Ezek a határok azonban nem mindig azok, amiknek látszanak. Az új tudományos ismeretek olykor félresöprik a korábban gondolt korlátokat. Csak egy példa a sok közül: a repülés történetének hajnalán a sugárhajtás korlátainak megállapítását célzó elemzések egyöntetűen azt látszottak bizonyítani, hogy a sugárhajtásos repülőgép kivitelezhetetlen.^[208]

A fentebb tárgyalt korlátok a jelenlegi ismereteink szerinti nanotechnológia korlátait jelentik. De mi van a pikotechnológiával, amit a méter billiomod (10^{-12}) részével mérnek, vagy a femtotechnológiával, ami a méter 10^{-15} -ed részének nagyságrendjébe esik? Ezekben a nagyságrendeken a szubatomi részecskékkel kellene számításokat végeznünk. A kisebb méretek pedig még nagyobb sebesség és sűrűség lehetőségét jelentik.

Több kezdeti stádiumban lévő, piko nagyságrendű technológiánk is létezik. Német tudósok létrehoztak egy atomerő-mikroszkópot (AMF), amely egy atom mindössze hetvenhét pikométer átmérőjű jellegzetességeit is képes érzékelni.^[209] A Kaliforniai Egyetem tudósai Santa Barbarában egy még ennél is nagyobb felbontású technológiát fejlesztettek ki: egy rendkívül érzékeny mérőeszközt, melyben a fizikai nyalábot egy gallium-arzenid kristály szolgáltatja, az érzékelőrendszere pedig a nyaláb akár egy pikométeres eltérülését is észleli. Az eszközzel a Heisenberg-féle határozatlansági elvet tervezik vizsgálni.^[210]

Az idődimenzió vonatkozásában a Cornell Egyetem tudósai mutattak be egy röntgenszóráson alapuló képalkotó technológiát, ami képes mozgóképfelvételeket készíteni egyetlen elektron mozgásáról. Mindegyik képkocka mindössze négy attoszekundum (egy attoszekundum egyenlő 10^{-18} szekundummal, a másodpercnél milliárdszor milliárdszor rövidebb időtartammal) történéseit rögzíti. Az eszköz térbeli felbontása eléri az egy angströmöt (10^{-10} métert, azaz 100 pikométert).

Mindazonáltal ismereteink az anyagról ebben a léptékben, különösen a femtométeres tartományban még nem elég fejlettek ahhoz, hogy számítási paradigmákat lehessen rájuk építeni. A piko- és a femtotechnológia *Engines of Creation*jét (A teremtés motorjai, Eric Drexler korszakos jelentőségű, 1986-ban megjelent könyve, amely a nanotechnológia alapvetésének tekinthető) még nem írták meg. Ugyanakkor az anyag és az energia viselkedését ebben a léptékben leíró, egymással versengő elméletek mindegyike olyan matematikai modelleket tartalmaz, amelyek számítógépesíthető transzformációkon alapulnak. A fizikában sok transzformáció az univerzális számítás alapjául szolgál (azaz olyanok, hogy belőlük általános célú számítógépeket építhetünk fel), és lehetséges, hogy ez a piko- és femtométeres tartomány viszonyaira is jellemző.

Természetesen még ha ki is derül, hogy az anyag alapvető mechanizmusai ezekben a tartományokban ugyanúgy viszonyaira is jellemző. akkor is fel kell még találnunk az ilyen típusú számítástechnikai alapelemek tömeges előállításának, illetve azok vezérlésének módszereit. Ezek hasonló problémák, mint amelyeket egyre gyorsabban oldunk meg jelenleg a nanotechnológia területén.^[211] Jelenleg azonban még nyílt kérdés, hogy a piko- és femto-számítástechnika megvalósítható lesz-e? Ugyanakkor a nano-számítástechnika komoly intelligenciaszinteket fog biztosítani, tehát ha az utóbb említettek egyáltalán lehetségesek, akkor a jövőbeli intelligenciánk segítségével bizonyosan megtaláljuk majd a szükséges eljárásokat. Nem azt a gondolat kíséretet kell elvégeznünk, hogy a jelenlegi emberiség képes-e piko- és femtotechnológiákat tervezni és megvalósítani, hanem azt, hogy a jövőbeli, nanotechnológiára alapuló, nagymértékben megnövekedett intelligenciánk (ami quadrilliószor erőteljesebb képességekkel fog bírni, mint a jelenlegi emberi intelligencia) képes lesz-e megvalósítani ezeket a technológiákat. Noha személy szerint hiszem, hogy a jövőbeli, nanotechnológiai alapú intelligenciánk képes lesz a nano nagyságrendnél kisebb nagyságrendű számítási rendszereket létrehozni, az ebben a könyvben a szingularitáshoz kapcsolódó jóslatok nem ezen a spekuláción alapulnak.

Amellett, hogy zsugorítjuk a számítástechnikai eszközeinket, egyúttal tömegessé is tehetjük – azaz ipari méretekben sokszorozhatjuk – őket. A teljesen kibontakozott nanotechnológia révén a számításokat végző erőforrások önreplikálóvá, önsokszorozóvá tehetőek, és így gyors ütemben intelligenssé változtathatják az anyagot és az energiát. Ebben azonban a fénysebességgel kell versenyt futnunk, mivel a világegyetem anyaga óriási távolságokban van szétszórva.

Amint arra később még kitérünk, akad néhány arra utaló jel, hogy a fény sebessége nem megváltoztathatatlan. Steve Lamoreaux és Justin Torgerson fizikusok, a Los Alamos National Laboratory munkatársai egy régi természetes nukleáris reaktor adatait elemezték, amely kétmilliárd évvel ezelőtt egy több százezer évig tartó fúziós reakciót hozott létre a mai Nyugat-Afrika

területén.^[212] A reaktorból visszamaradt radioaktív izotópokat elemezve és mai, hasonló nukleáris reakciók izotópjával összehasonlítva őket arra jutottak, hogy az α fizikai állandó (amit finomszerkezeti állandónak is neveznek), amely az elektromágneses erő nagyságát határozza meg, megváltozott az elmúlt kétmilliárd év során. Ez nagy jelentőséggel bír a fizika világa számára, ugyanis a fénysebesség a finomszerkezeti állandóval fordítottan arányos, és eddig mindkettőt megváltoztathatatlan állandónak tartották. Úgy tűnik, az α nagyon kis mértékben, értékének 4,5-ször százmilliomod részével megváltozhatott. Ha ez a feltételezés megerősítést nyer, az következik belőle, hogy a fény sebessége megnőtt.^[21]

Ezeket az előzetes eredményeket természetesen még gondosan ellenőrizni kell. Ha igazak, nagy jelentőséggel bírnak a civilizációnk jövője szempontjából. Ha a fény sebessége megnőtt, feltehetőleg nemcsak az idő múlása miatt történt így, hanem azért, mert megváltoztak bizonyos körülmények. Ha a fénysebesség a megváltozott körülmények miatt módosult, akkor az ajtó épp eléggé kinyílt ahhoz, hogy jövőbeli hatalmas intelligenciánk és technológiánk ereje szélesre tárja. Ez is olyasfajta tudományos felismerés, amit a mérnökök ki tudnak aknázni. Az emberi mérnöki tevékenységet gyakran érik természetes, sokszor alig észrevehető hatások, amelyeket aztán nagymértékben felerősítve von az ellenőrzése alá.

Még ha nehéz is lesz jelentősen meghaladni a fény sebességét az űr hatalmas távolságaiban, annak is fontos következményei lesznek a számítástechnika potenciáljának kiterjesztése szempontjából, ha csak egy eszköz szűk keretein belül járunk sikerrel. A fénysebesség ma is a számítástechnikai eszközök egyik korlátja, tehát ha sikerül meghaladnunk, akkor a számítástechnika korlátait is kitoljuk. A 6. fejezetben kitérünk még néhány érdekes, a fénysebesség lehetséges megnövelését vagy megkerülését célzó próbálkozásra is. A fénysebesség megnövelése ma még természetesen csak spekuláció, és a szingularitás bekövetkezésére vonatkozó elemzéseink egyike sem támaszkodik erre a lehetőségre.

Vissza az időben. Egy másik érdekes – és nagyon spekulatív – lehetőség az, hogy a téridő egy „feregjáratán” keresztül visszaküldünk az időben egy számítási folyamatot. Todd Brun, a princetoni Institute of Advanced Studies elméleti fizikusa elemezte az úgynevezett „zárt időszerű görbék” (CTC) segítségével történő számítások lehetőségét. Brun szerint a CTC-k képesek lehetnek „információt (például számítások eredményeit) küldeni saját múltbeli fénykúpjaikba.”^[213]

Brun nem tervezett meg egy ilyen eszközt, ám megmutatta, hogy egy ilyen rendszer konzisztens lenne a fizika törvényeivel. Időutazó számítógépe a „nagyapa-paradoxont” sem hozza létre, amit gyakran idéznek az időutazásról szóló értekezésekben. E szerint a közismert paradoxon szerint, ha valaki visszautazhatna az időben és megölné a nagyapját, akkor az illető nem is létezhetne, ám így a nagyapját sem ölhetné meg, tehát mégis létezne és visszamehetne az időben és megölné a nagyapját, és így tovább a végtelenségig.

Úgy tűnik, Brun időtágító számítási folyamata nem veti fel ezt a problémát, mivel nem gyakorol hatást a múltra. Határozott és egyértelmű választ ad egy feltett kérdésre – a jelenben. A kérdésre léteznie kell egyértelmű válasznak, és a válasz csak a kérdés feltétele *után* ismerhető meg, bár a választ meghatározó folyamat a kérdésfeltevés előtt is lejátszódhat a CTC segítségével. Hasonlóképpen a folyamat a kérdésfeltevést követően is lejátszódhat, hogy utána a CTC segítségével érkezzen vissza a válasz a jelenbe (de a kérdés feltevését nem megelőző időpontra, mert akkor megjelenne a nagyapa-paradoxon). Egy ilyen folyamatnak lehetnek alapvető akadályai (vagy korlátai), amiket még nem ismerünk, de ezeket az akadályokat még azonosítanunk kell. Ha az elmélet

megvalósítható lenne, akkor nagymértékben kiterjesztené a lokálisan elvégezhető számítások potenciálját. Mindazonáltal a számítási teljesítményekre és a szingularitás képességeire vonatkozó becsléseim során Brun hipotézisére sem támaszkodtam.

ERIC DREXLER: *Nem is tudom, Ray. Pesszimista vagyok a pikotechnológia megvalósíthatóságát illetően. Az általunk ismert stabil részecskék esetében nem értem, hogyan létezhetnének piko nagyságrendű struktúrák a nélkül az iszonyatos nyomás nélkül, amit az összeomlott csillagokban – a fehér törpékben vagy a neutroncsillagokban – találhatunk. Akkor meg egy nagy, tömör fémdarabot kapnánk, csak éppen a hagyományos anyagnál milliószor tömörebbet. Ez nem tűnik túl hasznosnak, még ha lehetséges is lenne a mi naprendszerünkben létrehozni. Ha a fizika ismerne egy részecskét, ami olyan stabil, mint az elektron, csak éppen százszor nehezebb, akkor teljesen más lenne a történet, de hát nem ismer.*

RAY: *Ma olyan gyorsítókkal manipuláljuk a szubatomi részecskéket, amelyek hatásai igencsak távol esnek a neutroncsillagokban uralkodó állapotoktól. Sőt, asztali berendezésekkel manipuláljuk a szubatomi részecskéket, mint például az elektronokat. A tudósok nemrég röptében elfogtak és megállítottak egy fotont.*

ERIC: *Igen, de miféle manipuláció ez? Ha általában a kis részecskék manipulálását is ide számítjuk, akkor az egész technológiánk már most pikotechnológia, hiszen minden anyag szubatomi részecskékből épül fel. Abból, hogy gyorsítóban részecskéket ütköztetünk egymással, csak hulladék keletkezik, nem gépek meg áramkörök.*

RAY: *Nem azt mondtam, hogy megoldottuk a pikotechnológia konceptuális problémáit. Felírtam a naptáramba, hogy ez a te feladatod lesz, 2072-ben.*

ERIC: *Ó, remek, ezek szerint hosszú életet jószolsz nekem.*

RAY: *Igen, ha vigyázol az egészségedre és rábízod magad a legmodernebb egészségügyi ismeretekre, orvosi és technológiai csúcstechnikára, ahogy én is próbálom tenni, akkor szerintem nagyon jó formában leszel akkoriban.*

MOLLY 2104: *Igen, a második világháború utáni nemzedékekből elég sokan megérték azokat az éveket. Ám a többség nem figyelt fel 2004-ben azokra a lehetőségekre, amelyeket kihasználva meg lehetett annyira hosszabbítani az életet, hogy lássák a biotechnológiai forradalom vívmányait, melyek egy évtizeddel később jelentek meg, s melyeket még egy évtizeddel később követett a nanotechnológia forradalma.*

MOLLY 2004: *Szóval, Molly 2104, te aztán nem semmi vagy, tekintettel arra, hogy 2080-ban ezer dollárnyi számítási teljesítmény fel fog érni tízmilliárd emberi agy tízezer évi gondolkodásával... csak éppen tíz mikroszekundum alatt. Gondolom, 2104-re még ennél jobb lesz a helyzet, és feltételezem, nem csak ezer dollár értékű számítási teljesítmény áll a rendelkezésedre.*

MOLLY 2104: *Ami azt illeti, átlagosan több millió dollárnyi... és ha kell, több milliárd dollárnyi.*

MOLLY 2004: *Ezt elég nehéz elképzelni.*

MOLLY 2104: *Na igen, azt hiszem, elég okos vagyok, amikor annak kell lennem.*

MOLLY 2004: *Pedig nem tűnsz annak.*

MOLLY 2104: *Próbálok leereszkedni a ti szintetekre.*

MOLLY 2004: *Na, álljunk meg egy percre, Molly kisasszony a jövőből...!*

GEORGE 2048: *Hölgyeim, kérem, mindketten nagyon vonzóak vagytok!*

MOLLY 2004: *Igen, persze, ezt mondd csak neki... azt hiszi, csilliósor okosabb nálam.*

GEORGE 2048: *Tudod, ő a jövőd. Én mindenesetre mindig is úgy éreztem, van valami különleges a biológiai nőkben.*

MOLLY 2104: *Ugyan mit tudhatsz te a biológiai nőkről?*

GEORGE 2048: *Nagyon sokat olvastam róluk, és részt vettem néhány nagyon pontos szimulációban.*

MOLLY 2004: *Az jutott eszembe, hogy talán mindkettőtöknek hiányzik valami, amiről nem is tudtok.*

GEORGE 2048: *Nem tudom, hogy lenne ez lehetséges.*

MOLLY 2104: *Nyilván sehogy.*

MOLLY 2004: *Erre a válaszra számítottam. De van valami, amiről úgy tudom, hogy ti meg tudjátok csinálni, és amit én nagyon királynak tartok.*

MOLLY 2104: *Csak egyvalami?*

MOLLY 2004: *Egy olyasmi, ami eszembe jutott. Össze tudjátok kapcsolni a gondolkodásokat másokéval, és közben mégis meg tudjátok őrizni az identitásotokat.*

MOLLY 2104: *Ha a helyzet... és a személy... megfelelő, akkor igen, ez valóban nagyon kellemes dolog.*

MOLLY 2004: *Olyan, mint beleszeretni valakibe?*

MOLLY 2104: *Mint szerelmesnek lenni valakibe. Ez a legmagasabb rendű osztózás.*

GEORGE 2048: *Szerintem neked is tetszeni fog, Molly 2004.*

MOLLY 2104: *Te csak tudod, George, hiszen te voltál az első, akivel csináltam.*

Negyedik fejezet

Az emberi intelligencia szoftverének megvalósítása: hogyan fejtsük vissza az emberi agyat?

„Jó okunk van azt hinni, hogy fordulóponthoz értünk, és a következő két évtizedben megérthetjük az agy működését. Ez az optimista vélemény több mérhető trenden alapul, valamint azon az egyszerű megfigyelésen, ami már többször bizonyítást nyert a tudomány történetében: a tudományos előrelépéseket olyan technológiai előrelépések teszik lehetővé, melyek révén olyasmit láthatunk, amit korábban nem. Nagyjából a XXI. század fordulóján egy érzékelhető fordulóponthoz értünk mind az idegtudományokban, mind a számítási teljesítményben. A történelem során most először tudunk annyit az agyunkról, és olyan fejlett számítástechnika áll rendelkezésünkre, hogy most már komolyan nekiláthatunk intelligenciánk jelentős részeire nézve egy verifikálható, valós idejű, nagy felbontású modell megalkotásának.”

(Lloyd Watts, idegtudós^[214])

„Most először globálisan figyelhetjük meg az agy működését, olyan tisztán, hogy valószínűleg fel tudjuk majd tárni a csodálatos képességei mögött rejlő programokat.”

*(J. G. Taylor, B. Horwitz,
K. J. Friston, idegtudósok^[215])*

„Az agy jó – élő bizonyíték arra, hogy az anyag bizonyos elrendeződése képes tudatot létrehozni, intelligens érvelést folytatni, mintázatokat felismerni, tanulni és egyéb fontos, a mérnöki érdeklődés körébe eső feladatot ellátni. Így az agytól kölcsönvett ötletek segítségével új rendszereket építhetünk... Az agy rossz – evolúció során kialakult, zavaros rendszer, amelyben sok interakció csak az evolúció esetlegességei miatt történik meg... Másfelől robusztus (hiszen biztosítja a túlélésünket), képes elviselni jelentős változásokat és környezeti hatásokat, tehát az agytól megtanulható igazán értékes dolog az lehet, hogyan hozzunk létre rugalmas, összetett, hatékonyan önszervező rendszereket... Az idegsejteken belüli kölcsönhatások bonyolultak, de eggyel magasabb szintről nézve az idegsejtek elég egyszerű dolgok, melyeket sokféleképp hálózatba lehet szervezni. Lokálisan nézve az agykérgi hálózatok nagyon zűrzavarosak, de ismét csak magasabbról szemlélve nem is olyan bonyolultak a kapcsolódásaik. Valószínű, hogy az evolúció több modult vagy ismétlődő témát hozott létre, amelyeket újra és újra felhasznál, és amikor megértjük ezeket és a kölcsönhatásaikat, mi is létrehozhatunk valami hasonlót.”

Az agy visszafejtése: a feladat áttekintése

Az emberi szintű intelligencia és a számítógépek eredendően magasabb rendű gyorsaságának, pontosságának és memóriamegosztási képességének az ötvözése óriási dolog lenne. Azonban a legtöbb MI-kutatás és -fejlesztés mindeddig nem feltétlenül az emberi agy működésén alapuló tervezési módszereket alkalmazott, azon egyszerű oknál fogva, hogy nem voltak meg az emberi gondolkodás részletes modelljének megalkotásához szükséges precíz eszközeink.

Képességünk az agy visszafejtésére – a belelátásra, a modellezésre és az egyes területeinek a szimulálására – exponenciális ütemben növekszik. Előbb-utóbb a gondolkodásunk teljes skálája mögött rejlő működési elveket meg fogjuk érteni, s ez a tudás hathatós módszereket fog biztosítani ahhoz, hogy kifejlesszük az intelligens gépek szoftvereit. Ezeket a technikákat módosítjuk, javítjuk és kiterjesztjük majd, miközben a biológiai idegsejtekben zajló elektrokémiai folyamatoknál sokkal nagyobb teljesítményű számítási technológiákban alkalmazzuk őket. Ennek a nagy ívű projektnek a legfontosabb eredménye saját magunk pontosabb megismerése lesz. Hatékony, új eszközeink lesznek az olyan idegrendszeri problémák kezelésére, mint az Alzheimer-kór, a szélütés, az agytrombózis, a Parkinson-kór, az érzékszervi fogyatékoságok, és végül óriási mértékben ki fogjuk tudni terjeszteni az intelligenciánkat is.

Új agyi képalkotó és modellező eszközök. Az agy visszafejtésében az első lépés az, hogy belenézünk, hogy megállapítsuk, mit csinál. Az ehhez használt eszközeink eddig durvák voltak, de a helyzet kezd megváltozni, mivel a jelentős számú új képalkotó eszköznek nagymértékben javult a tér- és időbeli felbontása, az ár-teljesítmény-aránya és a sávszélessége. Ezzel párhuzamosan gyorsan gyűlnek az adatok az agy alkotórészeinek és rendszereinek a pontos karakterisztikájáról és dinamikájáról, az egyes szinapszisoktól kezdve az olyan nagy területekig, mint a kisagy, amely az agy idegsejtjeinek több mint az olyan felét tartalmazza. Az aggyal kapcsolatos, exponenciálisan bővülő ismereteinket ma már kiterjedt adatbázisokban módszeresen katalogizálják. [\[216\]](#)

A kutatók munkája során az is bebizonyosodott, hogy modellek és működő szimulációk építése révén képesek vagyunk gyorsan megérteni és alkalmazni ezeket az információkat. Az agyterületek szimulációi a komplexitáselmélet és a káoszelmélet matematikai elveire épülnek, és már most olyan eredményeket mutatnak fel, melyek majdnem megegyeznek a valódi emberi és állati agyakon elvégzett kísérletek eredményeivel.

Ahogy a 2. fejezetben már említettem, az agy visszafejtéséhez szükséges képalkotó és számítástechnikai eszközök teljesítménye egyre nő, hasonlóan annak a technológiának az egyre gyorsuló fejlődéséhez, amely lehetővé tette a genom projekt végrehajtását. Amikor elérünk a nanobotkorba (lásd a *Szkennelés nanobotokkal* című részt a későbbiekben), képesek leszünk *belülről*, rendkívül nagy tér- és időbeli felbontásban feltérképezni az agyat. [\[217\]](#) Nem léteznek inherens akadályok azzal szemben, hogy képesek legyünk visszafejteni az emberi intelligencia működésének alapelveit, és átültessük a képességeit az előttünk álló évtizedekben megszülető, sokkal nagyobb teljesítményű számítási közegekbe. Az emberi agy összetett rendszerek komplex hierarchiája, de komplexitásának szintje nem haladja meg azt, amit már most képesek vagyunk kezelni.

Az agy szoftvere. A számítástechnika és a kommunikáció ár–teljesítmény-aránya évről évre a kétszeresére javul. Mint korábban láttuk, az emberi intelligencia emulálásához szükséges számítási kapacitás nem egészen két évtized múlva rendelkezésünkre fog állni.^[218] A szingularitás bekövetkeztét jósoló elmélet mögött rejlő egyik alapvető feltételezés az, hogy a nem biológiai médiumok képesek lesznek emulálni az emberi gondolkodás gazdagságát, finomságát és mélységét. Ám egyetlen emberi agy – de akár falvak, sőt országok kollektív intelligenciája – számítási teljesítményének hardveres megvalósítása sem fog még automatikusan emberi szintű képességeket létrehozni. („Emberi szintű” alatt azt értem, hogy az ember sokféleképpen intelligens, ideértve a zenei és képzőművészeti tehetséget, a kreativitást, a világban való fizikai navigációt, az érzelmek megértését és az azokra adott adekvát reakciókat.) A hardver számítási teljesítménye szükséges, de nem elégséges feltétel. Az erőforrások szerveződésének és tartalmának a megértése – az intelligencia szoftvere – sokkal fontosabb, és az agy visszafejtésének a célja ennek megvalósítása.

Amikor egy számítógép eléri az emberi intelligenciaszintet, szükségképpen túl is fogja szárnyalni azt. A nem biológiai intelligencia kulcsfontosságú előnye, hogy a gépek könnyen meg tudják osztani egymással a tudásukat. Ha valaki megtanul franciául, vagy elolvassa a *Háború és békét*, nem tudja egy az egyben átadni a tudását nekem, kénytelen leszek ugyanazzal a fáradságos tanulással szert tenni rá, mint ő. Egyelőre nem tudok gyorsan hozzáférni mások tudásához, ami a neurotranszmitter-koncentrációk (azok a vegyületek, amelyek a szinapszisokban lehetővé teszik, hogy az egyik idegsejt hasson a másikra) és idegsejtek közötti kapcsolatok (az idegsejtek axonoknak és dendriteknek nevezett nyúlványai, amelyek összekapcsolják az idegsejteket) hatalmas mintázatába van beágyazva.

De gondolkodjunk el a gépi intelligencián! Az egyik céggel éveket töltöttünk azzal, hogy mintázatfelismerő szoftver alkalmazásával megtanítsunk egy számítógépet a folyamatos emberi beszéd felismerésére.^[219] Több ezer órányi rögzített beszélgetést játszottunk le neki, kijavítottuk a hibáit, és türelmesen fejlesztettük a teljesítményét azzal, hogy tanígtattuk „kaotikus” önszervező algoritmusait (olyan algoritmusokat, melyek képesek saját szabályaik módosítására, félig véletlenszerű kezdeti adatokat használó folyamatokon alapulnak, és eredményeik nem teljes mértékben előre jelezhetőek). A számítógép végül elég jól felismerte a beszédet. Ma, ha valaki azt szeretné, hogy az otthoni számítógépe felismerje a beszédét, nem kell végigvezetni ugyanezen a lassú és fáradságos tanulási folyamaton (ahogy a gyerekeinkkel tesszük), hanem egyszerűen néhány másodperc alatt letöltjük a már kész mintázatokat.

Az agy analitikus és neuromorf modellje. Az emberi intelligencia és a jelenlegi MI közötti divergenciára jó példa az, hogyan oldanak meg egy sakkfeladványt. Az emberek mintázatokat ismernek fel, a gépek pedig óriási logikai „fákat” építenek a lehetséges lépésekből és az azokra adott reakciókból. Mind a mai napig a legtöbb technológia (mindenféle technológia) ez utóbbi, „felülről lefelé haladó”, analitikus tervezési megközelítést alkalmazta. A repülőgépeink például nem a madarak fiziológiáját és mechanikáját próbálják lemásolni. Ám ahogy a természet megoldásainak visszafejtéséhez szükséges eszközeink egyre fejlettebbek lesznek, a technológia egyre inkább a természet emulálása felé mozdul el, és közben sokkal nagyobb teljesítményű közegekben alkalmazza ezeket a technikákat.

Az intelligencia szoftverének megismerésére az a legvonzóbb foratókönyv, hogy közvetlenül az intelligens folyamatok legjobb, mindig kéznél lévő példáját, az emberi agyat csapoljuk meg. Noha az eredeti „tervezőjének” (az evolúciónak) több milliárd év kellett, hogy létrehozza az agyat, nekünk

mindig kéznél van, a koponya rejtekében, de a megfelelő eszközök segítségével láthatóan. Tartalmát egyelőre nem védi szabadalom vagy a szerzői jog. (Viszont számíthatunk rá, hogy ez változni fog; az agy visszafejtése során nyert eredményekre alapozva már nyújtottak be szabadalmi kérelmeket.^[220]) Az agyról készült felvételekből és idegrendszeri modellekből nyert több billió byte információt sok szinten fogjuk alkalmazni, hogy intelligensebb párhuzamos algoritmusokat tervezzünk a gépeinknek, különösen azoknak, amelyek önszervező paradigmákon alapulnak.

Ezzel az önszervező megközelítéssel nem kell megpróbálnunk minden egyes idegsejtkapcsolatot lemásolni. Az agy bármelyik tetszőleges területén rengeteg ismétlődő és redundáns megoldás található. Egyre inkább úgy tűnik, hogy az agyterületek magasabb szintű modelljei gyakran egyszerűbbek, mint idegsejt szintű alkotórészeik részletes modelljei.

Mennyire összetett az agy? Noha az emberi agyban tárolt információ nagyságrendileg egymilliárdszor milliárd bit (lásd a 3. fejezetben), az agy felépítése a meglehetősen tömör emberi genomon alapul. A teljes genom nyolcszázmillió byte, de ennek a nagy része redundáns, így körülbelül harminc-százmillió byte (kevesebb, mint 10^9 bit) egyedi információ marad (tömörítés után), ami kisebb, mint a Microsoft Word szövegszerkesztő program.^[221] A tisztesség kedvéért számításba kellene vennünk az „epigenetikus” adatokat is, amelyek a génexpressziót szabályozó fehérjékben tárolt információt (azaz minden egyes sejtre meghatározza, melyik géneknek szabad fehérjét létrehozniuk), illetve a teljes fehérje-replikáló rendszert, úgymint a riboszómákat és a seregnyi enzimet jelentik. Mindazonáltal ezek az információk nem változtatják meg ennek a számításnak a nagyságrendjét.^[222] A genetikai és epigenetikus információ több mint fele az emberi agy kiinduló állapotát írja le.

Agyunk komplexitása természetesen nagymértékben megnő, ahogy interakcióba kerülünk a világgal (körülbelül egymilliárdszorosa lesz a genoménak).^[223] Azonban minden egyes agyterületen többszörösen ismétlődő mintázatok találhatók, tehát nem szükséges megragadni minden egyes apró részletet ahhoz, hogy sikeresen visszafejtsük a releváns algoritmusokat, amelyek digitális és analóg metódusokat egyesítenek magukban (például egy neuron kisülése digitális eseménynek, míg a neurotranszmitterek szintváltozásai a szinapszisokban analóg értékeknek tekinthetők). A kisagy alapvető kapcsolási rajza például mindössze egyszer van leírva a genomban, mégis több milliárd példányban jön létre. Az agyi felvételekből és a modellekből szerzett információk alapján tervezhetünk szimulált „neuromorf” ekvivalens szoftvereket (azaz olyan algoritmusokat, amelyek funkcionálisan ekvivalensek egy adott agyterület általános működésével).

A működő modellek és szimulációk alkotásának fejlődése alig van lemaradva az agyi felvételektől és az idegsejtek szerkezetéről szerzett információktól. Több mint ötvenezer idegtudós van a világon, akik több mint háromszáz szaklapba írnak cikkeket.^[224] A tudományterület széles és sokszínű, a tudósok és mérnökök sok szinten hoznak létre új képalkotó és érzékelő technikákat, fejlesztenek modelleket és elméleteket. Gyakran még a tudományterület művelői sincsenek tisztában a napjainkban folyó kutatások teljes mélységével.

Az agy modellezése. Napjaink idegtudományában sokféle forrás, például agyi felvételek, az idegsejtek közötti kapcsolatokról alkotott modellek, idegsejtmodellek és pszichofizikai tesztek alapján fejlesztenek modelleket és szimulációkat. Mint korábban említettem, Lloyd Watts hallásrendszer-kutató kifejlesztett egy, az emberi halló- és hangfeldolgozó rendszer jelentős részére vonatkozó átfogó modellt az egyes idegsejttípusok és idegsejtek közötti kapcsolatinformációk

neurobiológiai vizsgálata alapján. Watts modelljében öt párhuzamos útvonal szerepel, valamint a hanginformáció konkrét reprezentációja az idegrendszeri feldolgozás egyes fázisaiban. Watts számítógépen, valós idejű szoftverként implementálta modelljét, és a program képes lokalizálni és azonosítani a hangokat, hasonlóan ahhoz, ahogyan az emberi hallás működik.

Ahogy azt Hans Moravec és mások feltételezték, ezek a működő funkcionális szimulációk körülbelül ezerszer kevesebb számítást igényelnek, mintha minden egyes dendrit, szinapszis és szubneurális struktúra nemlinearitását szimulálnánk az adott agyterületen. (Mint arra a 3. fejezetben kitértem, az agy funkcionális szimulációjának számításiigénye 10^{16} számítás per másodpercre becsülhető, szemben a szubneurális nemlinearitások szimulálásához szükséges 10^{19} számítás per másodperccel.^[225])

A jelenlegi elektronika jelsebessége körülbelül egymilliószerosa az idegsejtkapcsolatok által használt elektrokémiai jelzések sebességének. Ugyanezt az alacsony hatékonyságot találjuk biológiai létünk minden aspektusában, mivel a biológiai evolúció az összes mechanizmusát és rendszerét súlyosan korlátozott anyagkészletből építette fel: nevezetesen sejtekből, amelyek önmaguk is korlátozott fehérjekészletből állnak. Bár a biológiai fehérjék háromdimenziósak, olyan összetett molekulákra korlátozódnak, amelyek kibonthatók egy lineáris (egydimenziós) aminosav-szekvenciából.

A hagymahéjak lehántása. Az agy nem pusztán egy információfeldolgozó szerv, hanem több száz specializálódott terület bonyolult és többszörösen összekapcsolt együttese. A „hagymahámozás” folyamata, az összefonódott területek funkcióinak megértése jó úton halad. Ahogy az agyon belüli kapcsolatokról hozzáférhetővé válnak a szükséges idegsejtleírások és az adatok a hallórendszer területeiről készített szimulációhoz hasonló részletes, implementálható másolatok fognak készülni az összes agyterületről (*Egy másik példa: a hallásért felelős területek Watts-féle modellje, lásd később*).

Az agyat modellező algoritmusok többsége nem olyan szekvenciális, logikai eljárás, amit széles körben használnak napjainkban a digitális számítástechnikában. Az agy inkább önszervező, kaotikus, holografikus folyamatokat használ (vagyis az információ nem egy helyen van, hanem elosztva egy területen belül). Emellett főként párhuzamos, és hibrid analóg-digitális eljárásokat alkalmaz. Mindazonáltal számos kutatási projekt bebizonyította már, hogy képesek vagyunk megérteni ezeket a technikákat és hozzátenni őket az agyról és felépítéséről szerzett, gyorsan mélyülő és a gyakorlatban is felhasználható ismereteinkhez.

Miután megértettük egy adott terület algoritmusait, javíthatjuk és kiterjeszthetjük őket, mielőtt szintetikus neurális megfelelőikben implementálnánk őket. Olyan számítási közegben futtathatók, amely már most sokkal gyorsabb az idegrendszer áramköreinél. (A mai számítógépek a másodperc egymilliárdod része alatt végeznek el egy műveletet, szemben az idegsejtek közötti tranzakciók ezredmásodperceivel.) És a már ismert eljárásokat felhasználhatjuk intelligens gépek építésére.

Más-e az emberi agy, mint egy számítógép?

A válasz erre a kérdésre attól függ, mit értünk „számítógép” alatt. A legtöbb számítógép ma teljesen digitális, és egyszerre csak egy (esetleg néhány) műveletet végez, rendkívül nagy sebességgel. Ezzel szemben az emberi agy egyaránt használ digitális és analóg módszereket, ám a legtöbb számítást az analóg (folytonos) területen végzi, neurotranszmitterekkel és az azokhoz

kapcsolódó mechanizmusokkal. Noha ezek az idegsejtek rendkívül lassan végzik a számításaikat (általában kétszáz műveletet másodpercenként), az agy egésze zömében párhuzamos: az idegsejtek többsége egyszerre dolgozik, s így egyszerre akár százbillió műveletet is végrehajt másodpercenként.

Az emberi agy nagymértékű párhuzamossága a kulcs a mintázatfelismerő képességéhez, ami fajunk gondolkodásának egyik oszlopa. Az emlősök idegsejtjei kaotikus táncot járnak (azaz számtalan, látszólag véletlenszerű interakciót hajtanak végre), és ha a neurális hálózat jól tanulta meg a leckéit, kialakul egy stabil mintázat, amely a hálózat döntését tükrözi. Jelenleg a számítógépek csak korlátozott mértékben párhuzamos felépítésűek, azonban semmi sem indokolja, hogy ne lehetne ezeknek az alapelveknek a felhasználásával létrehozni a biológiai neurális hálózatok funkcionálisan ekvivalens nem biológiai megfelelőit. Sőt, a világon több tucat próbálkozás már sikerrel is járt. Az én szakterületem a mintázatfelismerés, és a projektek, amelyekben körülbelül negyven év során részt vettem, a számítástechnikának ezt a tanításalapú, nem determinisztikus formáját használják.

Az agy jellegzetes szerveződési metódusai közül sokat hatékonyan lehet hagyományos, kellő teljesítményű számítógépekkel szimulálni. Hiszem, hogy a természet tervezési paradigmáinak lemásolása kulcsfontosságú trend lesz a jövő számítástechnikájában. Arról sem szabad megfeledkeznünk, hogy a digitális számítástechnika funkcionálisan ekvivalens lehet az analóg számítástechnikával – azaz egy teljesen digitális számítógéppel is meg lehet valósítani egy hibrid analóg-digitális hálózat összes funkcióját. Ennek a fordítottja viszont nem igaz: egy analóg számítógéppel nem lehet szimulálni egy digitális számítógép összes funkcióját.

Mindazonáltal az analóg számítástechnikának van egy tervezési előnye: potenciálisan több ezerszer hatékonyabb. Egy analóg számítást el lehet végezni néhány tranzisztorral, vagy mint az emlősök idegsejtjeinek esetében, specifikus elektrokémiai folyamatokkal. Ezzel szemben a digitális számításokhoz több ezer, sőt több tízezer tranzistor szükséges. Másfelől, ez az előny behozható a digitális számítógépeken alapuló szimulációk könnyű programozhatóságával és módosíthatóságával.

Az agy számos fontos szempontból különbözik a hagyományos számítógépektől:

- *Az agy áramkörei nagyon lassúak.* A szinapszisok nyugalmi állapotba kerüléséhez és az idegsejtek stabilizálódásához szükséges idő (az az idő, amire az idegsejtnek és a szinapszisainak szüksége van az idegsejt kisülése után, hogy nyugalomba kerüljenek) olyan nagy, hogy nagyon kevés idegsejt-kisülési ciklus áll rendelkezésre a mintázatfelismerő döntések meghozatalához. A funkcionális mágneses rezonancia vizsgálatok (fMRI) és a magnetoenkefalográfia (MEG) eredményei kimutatták, hogy a többértelműség feloldását nem igénylő döntések egyetlen idegsejt-kisülési cikluson belül (kevesebb mint húsz milliszekundum alatt) megszületnek, s a döntés során gyakorlatilag nincsenek iteratív (ismétlődő) folyamatok. A tárgyfelismerés körülbelül 150 milliszekundum alatt történik, és még amikor „valamit alaposan átgondolunk”, a műveleti ciklusok száma akkor is csak százaz-ezres nagyságrendű, nem pedig milliárdos, mint egy hagyományos számítógép esetében.
- *Az agy azonban erősen párhuzamos.* Az agyban nagyságrendileg százbillió idegsejtközi kapcsolat található, melyek képesek párhuzamos, egyidejű működésre, információfeldolgozásra. Ennek a két tényezőnek (a lassú ciklusnak és a nagymértékű párhuzamosságnak) az eredménye az agy jellemző számítási teljesítménye, amiről a korábbiakban már beszéltünk.

A mai legnagyobb szuperszámítógépek kezdik megközelíteni ezt a tartományt. A vezető szuperszámítógépek (köztük azok, amelyeket a legnépszerűbb keresőmotorok használnak) számítási teljesítménye meghaladja a 10^{14} művelet per másodpercet, ami megfelel a

funkcionális szimulációhoz szükséges számítási kapacitás 3. fejezetben tárgyalt alsó értékének. Ugyanakkor nem feltétlenül szükséges ugyanolyan mértékű párhuzamos feldolgozást megvalósítanunk, mint az agyban tapasztalható, elég, ha megvan a teljes számítási és memóriakapacitás, és egyébként szimulálni tudjuk az agy erősen párhuzamos architektúráját.

- *Az agy egyszerre digitális és analóg.* Az agyi kapcsolatok topológiája lényegében digitális – egy adott kapcsolat vagy létezik, vagy nem. Egy kisülő axon nem teljesen digitális, de jól közelít egy digitális folyamatot. Az agy legtöbb funkciója analóg, és tele van nonlinearitásokkal (hirtelen kimenetváltozásokkal, szemben a fokozatosan változó szintekkel), melyek lényegüket tekintve sokkal összetettebbek, mint a klasszikus idegsejtmodellek. Mindazonáltal egy idegsejt és alkotórészei (dendritok, dendrittüskék, csatornák és axonok) modellezhetők a nemlineáris rendszerek matematikájával. Ezek a matematikai modellek tetszőleges pontossággal szimulálhatók egy digitális számítógépen. Mint említettem, ha nem digitális számítógépekkel, hanem natív analóg üzemmódban használt tranzistorokkal szimulálunk agyterületeket, akkor, ahogyan azt Carver Mead bebizonyította, három-négy nagyságrenddel nagyobb teljesítményt érhetünk el. ^[226]

- *Az agy képes újraszervezni önmagát.* A dendritok folyamatosan új töviseket és szinapszisokat hoznak létre. A dendritok és szinapszisok topológiája és vezetőképessége szinte folyamatosan változik. Noha a számítógépes mintázatfelismerő rendszerekben, például a neurális hálózatokban és Markov-modellekben felhasznált matematikai eljárások sokkal egyszerűbbek, mint az agyban lévők, megfelelő tervezési tapasztalatunk van az önszervező modellek terén. ^[227] A mai számítógépek a szó szoros értelmében nem húzozzák át magukat (bár a mostanában megjelenő „önjavító rendszerek” mintha ezt kezdenék el megvalósítani), de szoftveresen szimulálhatjuk ezt a folyamatot. ^[228] A jövőben ezt hardveresen is implementálni tudjuk majd, bár lehetnek előnyei annak, ha az önszerveződés nagy részét szoftveresen valósítjuk meg, nagyobb rugalmasságot biztosítva a programozóknak.

- *Az agyban a részletek többsége véletlenszerű.* Noha az agy minden területén nagyon sok sztochasztikus (gondosan szabályozott határok között véletlenszerű) folyamat zajlik, ugyanúgy nem szükséges az összes dendrit összes betüremkedését modellezni, mint ahogy nem kell ismerni az összes tranzistor minden felszíni részletét sem ahhoz, hogy megértsük a számítógép működési elvét. Bizonyos részletek azonban kritikusak az agy működési elvének dekódolása szempontjából, és ezért muszáj megkülönböztetnünk ezeket azoktól, amelyek a sztochasztikus „zajt” vagy káoszt generálják. Az idegrendszer működésének kaotikus (véletlenszerű és nem előrejelezhető) aspektusai a komplexitáselmélet és a káoszelmélet matematikai módszereivel modellezhetők. ^[229]

- *Az agy emergens tulajdonságokat használ.* Az intelligens viselkedés az agy kaotikus és komplex tevékenységének emergens, spontán előálló tulajdonsága. Gondoljunk a természet és hangyakolóniák látszólag intelligens felépítésére, az aprólékosan kialakított járat- és szellőzőrendszerekre! A természetvároknak és hangyabolyoknak okos és bonyolult felépítésük ellenére nincsenek főépítészeik; az építmények a bolyok külön-külön viszonylag egyszerű szabályokat követő tagjainak előre nem jelezhető interakciói során jönnek létre.

- *Az agy nem tökéletes.* A komplex adaptív rendszerek jellegzetessége, hogy a döntéseik emergens intelligenciája nem optimális. (Azaz alacsonyabb intelligenciaszinten működnek, mint tehetnék azt elemeik optimális elrendezése esetén.) Elég jónak kell lennie, ami a mi

fajunk esetében az ahhoz szükséges szintű intelligenciát jelenti, hogy életben maradjunk az ökológiai fülkénkben (szemben például a főemlősökkel, amelyeknél a kognitív funkciók szintén egy szembefordítható ujjal párosulnak, ám az agyuk nem olyan fejlett, mint az emberé, és a kezük sem olyan jól használható).

- *Ellentmondunk önmagunknak.* A magasabb rendű eredményekhez sokféle ötlet és elképzelés vezet el, melyek között egymásnak ellentmondóak is találhatók. Az agyunk képes egymásnak ellentmondó nézeteket fenntartani. Tulajdonképpen rengeteg minden ebből a belső sokféleségből származik. Gondoljunk az emberi társadalmak, különösen a demokratikus társadalmak analógiájára, melyek konstruktív módokon találják meg a különböző nézőpontok eredőit!

- *Az agy fejlődik.* Az agy által használt alapvető tanulási paradigma az evolúció terméke: azok a kapcsolatmintázatok maradnak fenn, amelyek a legsikeresebben értelmezik a világot és járulnak hozzá a felismerésekhez és döntésekhez. Az újszülöttek agyában főleg véletlenszerűek az idegsejtközi kapcsolatok, és kétéves korra ezeknek csak egy része marad meg.^[230]

- *A mintázatok fontosak.* Ezeknek a kaotikus önszervező metódusoknak bizonyos részletei, melyek a modellek korlátaiként (a kezdeti állapotokat és az önszervezés eszközeit meghatározó szabályokként) jutnak kifejeződésre, létfontosságúak, amennyiben magukon a korlátokon belül bizonyos részletek kiinduló értéke véletlenszerű. A rendszer ezek alapján kezdi el megszervezni magát, és fokozatosan megjeleníti a rendszerhez eljutó információk invariáns jellegzetességeit. Az így létrejövő információ nem bizonyos csomópontokban vagy kapcsolódásokban található meg, hanem egy elosztott mintázat formájában.

- *Az agy holografikus.* Párhuzam állítható fel a hologramok elosztott információja és az agyi hálózatok információtárolásának módszere között. Ugyanez fellelhető a számítógépes mintázatfelismerés során használt módszerekben, például a neurális hálózatokban, a Markov-modellekben és a genetikai algoritmusokban is.^[231]

- *Az agy erősen összefüggő hálózat.* Az agy rugalmas, mivel egy nagyon sok kapcsolattal rendelkező hálózat, amelyben az információ sokféle útvonalon juthat el egyik pontból a másikba. Gondoljunk az internet analógiájára, ami egyre stabilabbá vált, ahogy a csomópontjainak száma növekedett! Az internet egyes csomópontjai, sőt egész alhálózatok is működésképtelenné válhatnak anélkül, hogy az egész hálózat összeomlana. Hasonlóképpen mi is folyamatosan veszítünk el idegsejteket, az agy egészének integritása mégsem sérül.

- *Az agyterületek rendszerbe szerveződnek.* Noha egy-egy agyterület kapcsolatainak bizonyos részletei kezdetben véletlenszerűek, és a modellkorlátok és az önszerveződés szabályai szerint szerveződnek tovább, több száz, különleges funkciót betöltő területnek kötött a felépítése, az adott területre jellemző kapcsolati mintázattal.

- *Az agyterületek felépítése egyszerűbb, mint egy neuroné.* A modellek magasabb szinten gyakran nem bonyolultabbá, hanem egyszerűbbekké válnak. Gondoljunk a számítógép analógiájára! Egy tranzistor modellezéséhez meg kell értenünk a félvezetők részletes fizikáját, és a tranzistor működését leíró egyenletek igen bonyolultak. Ezzel szemben egy digitális áramkör, ami két számot szoroz össze, hiába áll akár több száz tranzistorból, sokkal egyszerűbben modellezhető, és mindössze néhány képlettel leírható a működése. Egy több milliárd tranzistorból álló számítógépet modellezni lehet az utasításkészletének és regisztereinek a leírásával, amelyek elférnek néhány szöveggel és matematikai képletekkel

teleírt papírlapon.

Az operációs rendszerek, a programnyelvekhez tartozó fordítóprogramok és assemblerek meglehetősen bonyolultak, de egy adott program – például egy, a Markov-modellen alapuló beszédfelismerő program – modellezése mindössze néhány oldalnyi egyenlettel leírható. Egy-egy ilyen leírás nyomokban sem utal a félvezetők konkrét fizikájára. Hasonló a helyzet az aggyal is. Egy bizonyos idegsejti elrendeződés, ami egy bizonyos állandó vizuális vonást (például egy arcot) érzékel, vagy ami hullámsávszűrést végez (adott frekvenciatartományra korlátozva a kimenetet) a hanginformációkon, vagy ami két esemény időbeli közelségét méri fel, sokkal egyszerűbben leírható, mint az egyes folyamatokban részt vevő neurotranszmitterek, szinapszisok és dendritok apró változásai. Noha ezt az idegrendszeri összetettséget gondosan mérlegelni kell, mielőtt (az agy modellezése során) egy szinttel feljebb lépünk, a nagy részük jelentősen egyszerűsíthető, ha megértjük az agy működésének alapelveit.

Próbáljuk megérteni saját gondolkodásunkat
A kutatások gyorsuló üteme

Jelenleg a görbe térdéhez (a gyors exponenciális növekedés szakaszához) közeledünk az emberi agy megértésének egyre gyorsuló folyamatában, de a próbálkozásaink ezen a téren régre nyúlnak vissza. Azon képességünk, hogy reflektáljunk a gondolkodásunkra és modelleket alkossunk róla, fajunk egyedi jellegzetessége. Az első mentális modellek szükségképpen a külső viselkedés megfigyelésén alapultak (például Arisztotelész 2350 évvel ezelőtti elemzése az ember azon képességéről, hogy képzeteket társítson össze).^[232]

A XX. század elején kifejlesztettük azokat az eszközöket, amelyekkel megvizsgálhatók az agyon belül zajló fizikai folyamatok. Az első áttörések között szerepelt az idegsejtek elektromos kimenetének a megmérése, amit az idegtudományok úttörője, E. D. Adrian dolgozott ki 1928-ban, bebizonyítva, hogy az agyban elektromos folyamatok zajlanak.^[233] Ahogy Adrian írta: „Bizonyos retinakísérletek során elektródákat kötöttem egy béka látóidegeire. A szobában majdnem teljesen sötét volt, és meglepve hallottam, hogy az erősítőhöz kapcsolt hangszóróból zajok törnek fel, ami azt jelentette, hogy nagy mennyiségű impulzus sült ki. Amikor felismertem az összefüggést a zajok és a szobában végzett mozgásom között, rájöttem, hogy a béka szemének látómezejében vagyok, és a hangok a mozgásom nyomán jönnek létre.”

A felismerés, amit Adrian tett a kísérlet során, ma már az idegtudomány egyik sarokköve: az érzékelőidegből érkező impulzusok frekvenciája egyenesen arányos a mért érzékszervi jelenség intenzitásával. Például minél erősebb a fény, annál magasabb frekvenciával jut idegi impulzus a retinából az agyba. Adrian egyik tanítványa, Horace Barlow tett egy másik örök érvényű felfedezését: felismerte az idegsejtek „kapcsoló jellegét”, amikor rájött arra, hogy a békák és nyulak retinájában egyedülálló idegsejtek vannak, melyek bekapcsolódnak, amikor bizonyos alakokat, irányokat vagy sebességeket „látnak”. Más szóval, az érzékelésnek több fázisa van, és az idegsejtek minden rétege a kép egyre kifinomultabb vonásait ismeri fel.

1939-ben kezdtünk el foglalkozni alkotni arról, hogyan működnek az idegsejtek: összegyűjtik (összeadják) a bemeneteiket, majd fokozzák a membrán vezetőképességét (hirtelen megnő az idegsejt sejthártyájának a jeltovábbító képessége), és feszültség keletkezik az idegsejt axonja (ami összekapcsolódik a többi idegsejttel egy szinapszison keresztül) mentén. A. L. Hodgkin és A. F. Huxley alkotta meg az axon „akciós potenciáljának” (feszültségének) az elméletét.^[234] 1952-ben ténylegesen is megmérték egy állati axon akciós potenciálját.^[235] A mérete és hozzáférhetősége miatt egy tintahal idegsejtjeit választották.

Hodgkin és Huxley eredményeire építve W. S. McCulloch és W. Pitts 1943-ban kidolgozott egy egyszerűsített idegsejt- és neurálishálózat-modellt, amely fél évszázadnyi munkát inspirált a mesterséges (szimulált) neurális hálózatok terén (amikor egy számítógépes programmal szimulálják azt, ahogyan az agy idegsejtjei hálózatként működnek az agyban). Ezt a modellt Hodgkin és Huxley 1952-ben továbbfejlesztette. Noha ma már tudjuk, hogy az egyes idegsejtek sokkal bonyolultabbak, mint ezek a korai modellek, az eredeti koncepció sokáig kitartott. Ebben az alapszintű neurálishálózat-modellben minden szinapszishoz tartozik egy neurális „súly” (ami a kapcsolat „erősségét” mutatja), illetve minden idegsejttesthez egy nemlinearitás (kisülési küszöb).

Ahogy az idegsejt sejttestébe érkező súlyozott inputok növekednek, az idegsejt viszonylag kevésbé reagál, míg az input el nem ér egy kritikus küszöböt, amikor is az idegsejt sebesen megnöveli az axonjának az outputját és kisül. A különböző idegsejteknek más és más a küszöbértéke. Noha a

legújabb kutatások arra utalnak, hogy a valódi reakció ennél összetettebb, a McCulloch-Pitts és a Hodgkin-Huxley-modellek lényegüket tekintve érvényesek maradtak.

Ezek a felismerések tetemes mennyiségű korai munkát eredményeztek a mesterséges neurális hálózatok területén, mely később konnekcionizmus néven vált ismertté. Talán ez volt az első önszervező paradigma a számítástechnika területén.

Az önszervező rendszerek egyik kulcsfontosságú követelménye a nonlinearitás: valamilyen módszer olyan kimenetek létrehozására, amelyek nem pusztán a bemenetek súlyozott összegei. Az első neurálishálózat-modellek képesek voltak biztosítani ezt a nonlinearitást.^[236] (Az alapvető neurális hálózat megvalósítása elég egyszerű.^[237]) Körülbelül ugyanebben az időszakban Alan Turingnak a számítástechnika elméleti modelljein végzett munkája szintén azt mutatta ki, hogy a számítástechnikának is feltétele a nonlinearitás. Azok a rendszerek, melyek egyszerűen a bemenetek súlyozott összegét hozzák létre, nem felelnek meg a számítástechnika lényegi követelményeinek.

Ma már tudjuk, hogy a valódi biológiai idegsejtek sok más nem lineáris tulajdonságokkal is rendelkeznek a szinapszisok elektrokémiai aktivitása és a dendritek morfológiája (alakja) miatt. A biológiai idegsejtek különböző elrendezése képes számítások elvégzésére: összeadásra, kivonásra, szorzásra, osztásra, átlagszámításra, az ingerületek szűrésére, normalizálására, határérték figyelésére, és még sok más műveletre.

Az, hogy az idegsejtek képesek szorozni, azért fontos, mert lehetővé teszi, hogy az agy egyik neuronhálózatát modulálják (befolyásolják) egy másik hálózat számítási eredményei. Az elektrofiziológiai berendezésekkel majmokon végzett kísérletek azt bizonyítják, hogy a képfeldolgozás során az idegsejtkisülések száma a vizuális kéregben növekszik és csökken, attól függően, hogy a majmok odafigyelnek-e a kép egy adott területére, vagy sem.^[238] Az embereken végzett fMRI-kutatások is azt mutatták, hogy egy kép adott területére való odafigyelés növeli a képet feldolgozó idegsejtek érzékenységet a V5-nek nevezett, a mozgásérzékelésért felelős agykérgi területen.^[239]

Egy másik fontos áttörés 1949-ben történt, amikor Donald Hebb megfogalmazta nagy hatású elméletét, a „Hebb-szabályt” a neurális tanulásról: ha egy szinapszist (vagy egy szinapsziscsoportot) ismételten stimulálnak, akkor az a szinapszis megerősödik. Idővel a szinapszis kondicionálása tanulási reakciót vált ki. A konnekcionista mozgalom ez alapján a modell alapján tervezett neurálishálózat-szimulációkat, lendületet adva az ilyen kísérleteknek az 1950-es és 1960-as években.

A konnekcionista mozgalom 1969-ben kezdett el hanyatlani, amikor az MIT két kutatója, Marvin Minsky és Seymour Papert kiadta a *Perceptrons* (Perceptronok) című könyvét.^[240] Szerepelt benne egy tétel, amely azt bizonyította, hogy az akkoriban használatos leggyakoribb (és legegyszerűbb) neurális hálózat (a Perceptron, amelyet Frank Rosenblatt fejlesztett ki a Cornell Egyetemen) még egy olyan egyszerű problémát sem képes megoldani, mint annak eldöntése, hogy egy vonalrajz teljesen összefüggő-e.^[241] A neurálishálózat-mozgalom az 1980-as években kapott új lendületet a *backpropagation* (visszaterjesztés) módszer alkalmazásával, amely révén a stimulált szinapszisok erősségét egy olyan tanulási algoritmussal határozták meg, ami minden tanulási próba után módosította minden egyes mesterséges neuron súlyát (a kimenet erősségét), s így a hálózat „megtanult” pontosabban megfelelni a helyes válasznak.

Mindazonáltal a visszaterjesztés a valódi biológiai neurális hálózatokban nem alkalmazható modell, mivel úgy tűnik, az emlősök agyában nincsenek olyan visszafelé ható kapcsolatok, melyek valóban módosítanák a szinaptikus kapcsolatok erejét. A számítógépekben viszont ez a fajta önszervező rendszer a mintázatfelismerési problémák széles körét képes megoldani, és bizonyítást nyert az önszervező, összekapcsolt neuronok ezen egyszerű modelljének az ereje.

Kevésbé ismert Hebb másik tanulási formája: egy feltételezett hurok, amelyben a neuron ingerlése visszahat önmagára (talán más rétegeken keresztül), és „jelvisszaverődések” jönnek létre (folyamatosan újabb ingerek érik a hurokban lévő neuronokat). Hebb elmélete szerint ez a fajta visszaverődés lehet a rövid távú tanulás forrása. Azt is felvetette, hogy ez a rövid távú visszaverődés vezethet el a hosszú távú emlékek kialakulásához: „Tegyük fel, hogy egy visszaverődést kiváltó tevékenység (vagy „nyom”) tartós megléte vagy ismétlődése végül maradandó sejtszintű változást okoz, ami megnöveli a tevékenység stabilitását. A feltételezést a következőképpen lehet egzaktan megfogalmazni: Amikor »A« sejt axonja elég közel van ahhoz, hogy ingerelje »B« sejtet, és ismétlődően vagy tartósan kisülésre készteti azt, akkor valamiféle növekedési folyamat vagy anyagcsere-változás következik be egyik vagy mindkét sejtben, amelynek nyomán az »A« sejtnek, mint a »B« sejtet kisütő sejtek egyikének, megnövekszik a hatékonysága.”

Noha Hebb visszaverődő memória elmélete nem annyira megalapozott, mint a szinaptikus tanulása, a közelmúltban felfedeztek rá néhány példát. Például a serkentő neuronok csoportjai (melyek egy szinapszist stimulálnak) és a gátló neuronok (melyek gátolják a stimulusokat) bizonyos vizuális mintázatok jelenlétében oszcillálni kezdenek.^[242] Az MIT és a Lucent Technologies Bell laboratórium kutatói pedig létrehoztak egy tranzisztorokból álló integrált áramkört, ami tizenhat serkentő neuron és egy gátló neuron viselkedését szimulálva másolja le az agykéreg biológiai

Bepillantás az agyba

„Sikerült a műszereink pontatlanságát és zaját olyan szintre csökkenteni, hogy most már ezeknek a molekuláknak a legparányibb, saját átmérőjüknel is kisebb távú mozgásait is látjuk... Ilyen kísérletekről tizenöt évvel ezelőtt még csak álmodozni lehetett.”

*(Steven Block,
a biológia és az alkalmazott fizika professzora,
Stanford Egyetem)*

Képzeljük el, hogy megpróbáljuk visszafejteni egy számítógép működését anélkül, hogy bármit is tudnánk róla (ez a „fekete doboz” módszer)! Kezdhetjük azzal, hogy mágneses érzékelőket rakunk a berendezés köré. Azt fogjuk látni, hogy az adatbázist frissítő műveletek során bizonyos áramköri panelek jelentős aktivitást mutatnak. Valószínűleg azt is megfigyeljük, hogy ezen műveletek során a merevlemez is működésbe lépett. (Ami azt illeti, a merevlemez kattogásának figyelése egy régóta ismert, bár nem túl pontos eszköz annak a megállapítására, hogy mit csinál a számítógép.)

Ezután megalkothatjuk azt az elméletet, hogy a merevlemeznek valamilyen köze van az adatbázisokat tároló hosszú távú memóriához, és az áramköri panel, amely aktivitást mutatott a művelet során, részt vett a tárolandó adatok továbbításában. Ebből hozzávetőlegesen megállapíthatjuk, hol és mikor történnek a műveletek, de nem sokat tudunk meg arról, hogyan valósulnak meg ezek a feladatok.

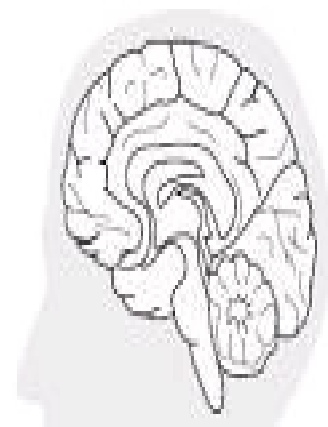
Ha a számítógép regisztereire (ideiglenes adattárolóira) visszajelző lámpákat csatolnánk (mint ahogy a legelső számítógépek valóban így néztek ki), azt látnánk, hogy a lámpák villognak, jelezve, hogy gyors változások követik egymást a regiszterekben, miközben a számítógép elemzi az adatokat, és lassú változások történnek, amikor a számítógép továbbítja az adatokat. Ebből arra következtethetnénk, hogy a lámpák valamiféle analitikus viselkedés közben tükrözik a logikai állapotok változásait. Ezek a megfigyelések helyesek lennének ugyan, de durvák, és nem dolgozhatnánk ki belőlük elméletet a számítógép működésére, és arról sem tudnánk meg semmit, hogyan kerül valójában kódolásra és továbbításra az információ.

Ez a gondolkísérlet analóg azokkal az erőfeszítésekkel és próbálkozásokkal, amelyek az emberi agy feltérképezését és modellezését célozták, az éppen rendelkezésre álló durva eszközökkel. A jelenlegi agyi képalkotási kutatásokon (melyek fMRI-t, MEG-t és egyéb, a későbbiekben részletesen tárgyalandó módszereket alkalmaznak) alapuló modellek többsége legfeljebb utalhat a mélyben rejlő mechanizmusokra. Noha ezek a kutatások értékesek, alacsony tér- és időbeli felbontásuk nem elégséges az agy kiemelkedő képességeinek a visszafejtéséhez.

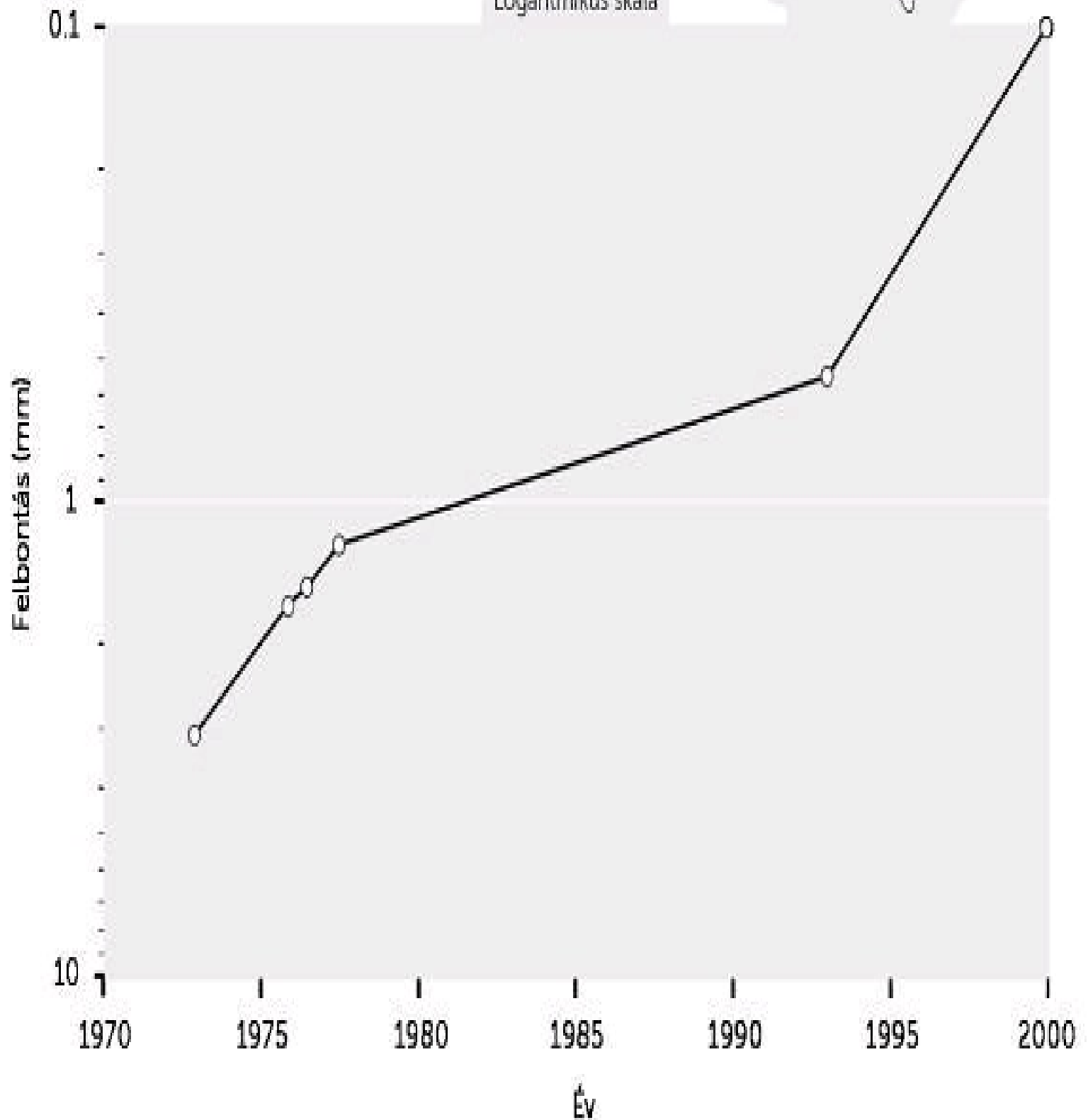
Új agyi képalkotó eszközök. A fenti példánál maradva képzeljük el, hogy pontos érzékelőket helyezhetünk el az áramkör bizonyos pontjain, és hogy ezek a szenzorok igen nagy sebességgel képesek nyomon követni az egyes jeleket! Ekkor rendelkezésünkre állnának azok az eszközök, amelyek szükségesek ahhoz, hogy valós időben nyomon kövessük a továbbított adatokat, és képesek

legyünk részletes leírást készíteni az áramkörök működéséről. A mérnökök pontosan így, a számítógépben továbbított jeleket vizuális információvá alakító logikai analizátorokkal ismerik meg és javítják ki az olyan áramkörök hibáit, mint a számítógépek alaplappjai (például azért, hogy visszafejtsék valamelyik piaci versenytárs termékét).

A nem invazív agyi képalkotó berendezések felbontása



Logaritmikus skála

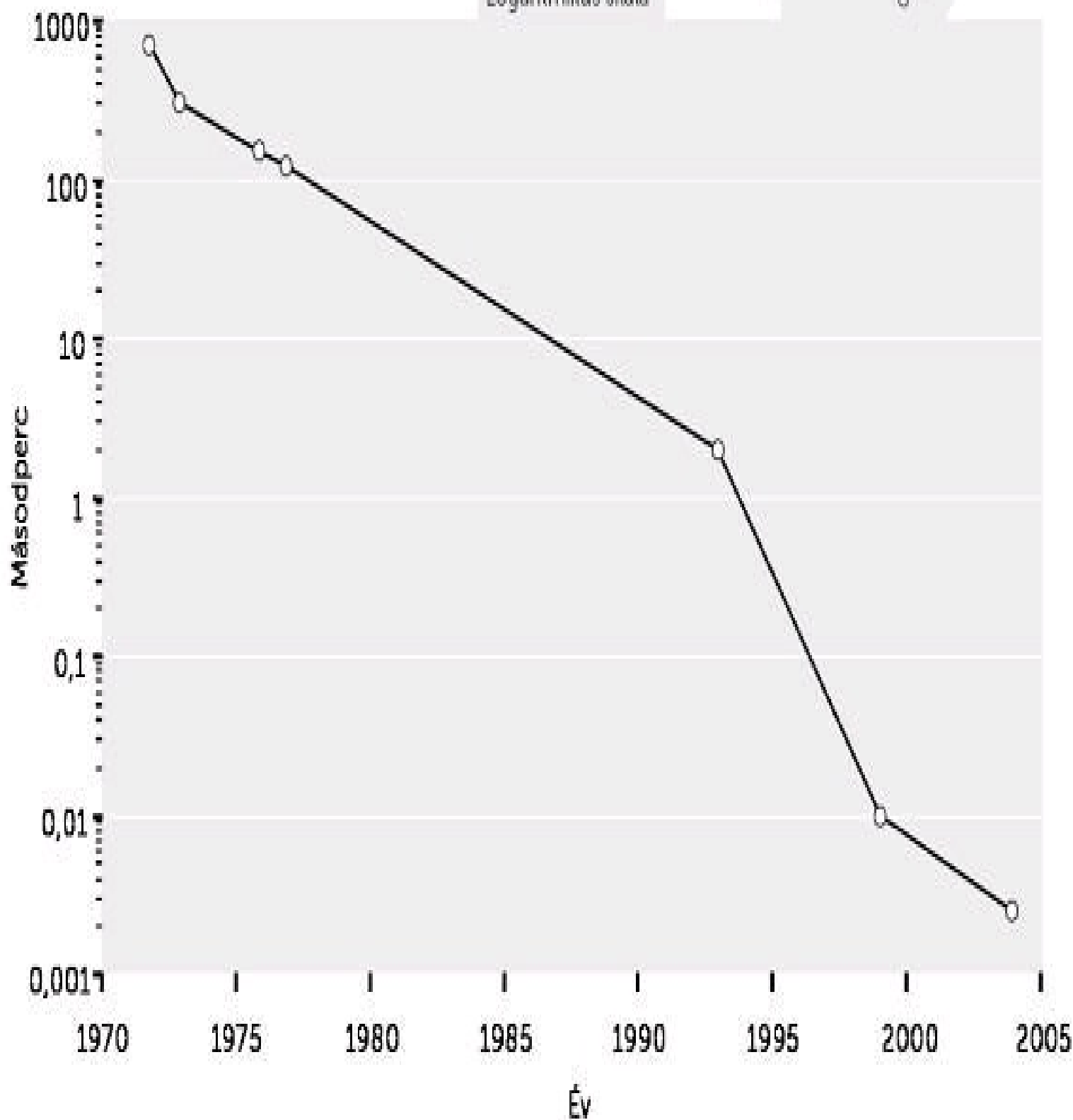
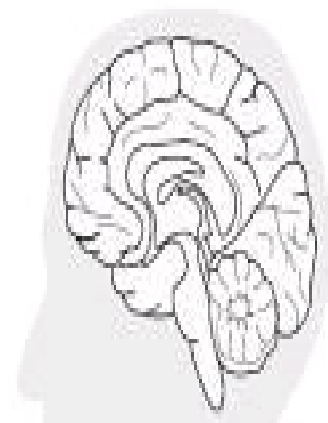


Az idegtudomány még nem rendelkezik olyan érzékelőkkel, amelyek lehetővé tennék az ilyen jellegű elemzést, de ez a helyzet hamarosan meg fog változni. Az agyunkba való bepillantáshoz szükséges eszközök exponenciális sebességgel fejlődnek. A nem invazív agyi képalkotó berendezések felbontása körülbelül tizenkét hónaponként megduplázódik.^{[\[244\]](#)}

Az agyi képalkotó berendezések képi rekonstrukciójának sebességében is hasonló fejlődést figyelhetünk meg:

Az agyi képalkotó berendezések képrekonstrukciós ideje (másodperc)

Logaritmikus skála



A leggyakrabban használt agyi képalkotó eszköz az fMRI, amelynek viszonylag nagy, egy-három milliméteres a térbeli felbontása (ám ez nem elég nagy, hogy az egyes idegsejtekről felvételeket készítsünk), azonban alacsony, néhány másodperc az időbeli felbontása. A legújabb generációs fMRI-technológia időbeli felbontása körülbelül egy másodperc, illetve egy vékony agyszelvény esetében egytized másodperc.

Egy másik széles körben alkalmazott technika az MEG, amely a koponya körüli gyenge mágneses mezőket méri, amelyeket alapvetően az agykéreg piramidális sejtjei hoznak létre. Az MEG időbeli felbontása jó (egy milliszekundum), de a térbeli felbontása nagyon rossz, körülbelül egy centiméter.

Fitz Sommer, a Redwood Idegtudományi Intézet kutatója az fMRI-t és az MEG-t próbálja egyesíteni, hogy javítsa a mérések tér- és időbeli felbontását. Más, jelenleg is folyó kutatások bebizonyították, hogy az fMRI-vel fel lehet térképezni a kolumnáris és lamináris struktúráknak nevezett területeket, melyek töredék-milliméter szélesek, illetve, hogy az fMRI képes a milliszekundum tized része alatt lejátszódó történéseket is érzékelni.^[245]

Az fMRI és egy vele rokonságban álló, pozitronokat használó technika, a pozitronemissziós tomográfia (PET) egyaránt közvetett módon méri az idegsejtek aktivitását. A PET az agyterületi véráramlást (rCFB) méri, az fMRI pedig a vér oxigénszintjét.^[246] Noha a véráramlás mértéke és az idegsejti aktivitás közötti összefüggést övezik bizonyos viták, a konszenzus az, hogy az a helyi szinaptikus aktivitást tükrözi, nem a neuronok tüzelését. Az idegsejtek aktivitása és a véráramlás közötti összefüggést először a XIX. század végén fogalmazták meg.^[247] Az fMRI korlátja az, hogy a véráramlás és a szinaptikus aktivitás közötti összefüggés nem közvetlen: számos anyagcsere-mechanizmus van hatással a két jelenség viszonyára.

Mindazonáltal a PET-et és az fMRI-t tartják a legmegbízhatóbb módszernek az agyi állapotok relatív változásainak a mérésére. Elsősorban a „szubtrakciós paradigmát” alkalmazzák, ami az adott feladatok végzése során legaktívabb területeket tudja megmutatni.^[248] A folyamat során kivonják azokat az adatokat, amelyeket a vizsgált személyen a tevékenység *nem* végzése során mérnek azokból, amelyeket az adott mentális tevékenység végzése során rögzítenek. A különbség jelenti az agy állapotának változását.

Magas térbeli és időbeli felbontást biztosít az „optikai képalkotás” nevű invazív módszer, melynek során eltávolítják a koponya egy részét, megfestik az élő agyszövetet egy festékkel, ami idegsejti aktivitás esetén fluoreszkál, majd egy digitális kamerával rögzítik az így kibocsátott fényt. Mivel az optikai képalkotás sebészi beavatkozást igényel, főleg állatkísérletekben, különösen egereken alkalmazzák.

Egy másik, a különböző agyi területek funkcióinak azonosítására szolgáló módszer a transzkraniális mágneses stimuláció (TMS), amely során erős mágneses mezőt hoznak létre a koponyán kívül egy pontosan a fej fölött elhelyezett elektromágneses tekercsel. Az agy egyes területeinek stimulálásával vagy „virtuális károsításával” (ideiglenes megbénításával) bizonyos képességek felfokozhatók vagy megszüntethetők.^[249] A TMS adott feladatok végrehajtása során a különböző agyi területek közötti kapcsolatok tanulmányozására is használható, sőt misztikus élmények is kiválthatók vele.^[250] Allan Snyder agykutató beszámolója szerint TMS-sel vizsgált alanyainak mintegy 40 százaléka szignifikáns új képességeket mutatott, közöttük nagyon látványosakat is, például hirtelen javuló rajzkészséget.^[251]

Ha módunkban állna elpusztítani a vizsgált agyat, drámaian magasabb térbeli felbontásra nyílna lehetőség. Ma már lehetséges feltérképezni egy fagyasztott agyat, bár még nem elég nagy sebességgel és sáv szélességgel ahhoz, hogy meghatározzuk az összes belső kapcsolatát. Azonban a gyorsuló megtérülések törvényének értelmében ez a technikai lehetőség is exponenciálisan javul, mint ahogy az

agykutatás összes többi aspektusa.

Andreas Nowatzyk, a Carnegie Mellon Egyetem kutatója egy egér centrális és perifériás idegrendszerét térképezi fel kétszáz nanométernél kisebb felbontással, ami már megközelíti a teljes visszafejtéshez szükséges felbontást. Az „agyszövetszkennér” elnevezésű másik destruktív képalkotó eszköz, amelyet a texasi A&M Egyetem Agyi Hálózatok Laboratóriuma fejlesztett ki, képes 250 nanométeres felbontással egy hónap alatt beszkenyelni egy teljes egéragyat, szeletenként.^[252]

A felbontás növelése. A jelenleg fejlesztés alatt álló új agyi képalkotó technológiák idő- és térbeli felbontása egyaránt drámaian növekszik. Az érzékelő- és képalkotó rendszerek új nemzedéke biztosíthatja azokat az eszközöket, amelyek a soha nem látott részletességű modellek megalkotásához szükségesek. A következőkben bemutatok néhányat ezek közül az érzékelő- és képalkotó rendszerek közül.

Egy különösen érdekes kamerát fejlesztenek a Pennsylvániai Egyetemen, az Idegrendszeri Kutatólaboratóriumban, Leif H. Finkel vezetésével.^[253] Az optikai rendszer tervezett térbeli felbontása elég magas lesz ahhoz, hogy érzékelje az egyes idegsejteket, az időbeli felbontása pedig egy milliszekundum lesz, ami elég ahhoz, hogy rögzítsék az egyes idegsejtek kisülését.

Az első változatok körülbelül száz sejtet képesek egyszerre megfigyelni, maximum tízmikronos mélységben. A tervezett későbbi változatok ezer sejtet tudnak majd leképezni, maximum 150 mikron távolságból, milliszekundumnál kisebb időbeli felbontással. A rendszer képes lesz *in vivo* (az élő agyban) letapogatni az idegszöveteket, miközben az állat mentális feladatot hajt végre – bár az agy felszínének szabadnak kell lennie. Az idegszövetet megfestik elektromos feszültség hatására fluoreszkáló festékkel, ennek a fényét érzékeli a nagy felbontású kamera. A képalkotó rendszerrel azelőtt és azután fogják megvizsgálni az állatok agyát, hogy elsajátítottak bizonyos perceptuális képességeket. A rendszer rendelkezik az MEG gyors (egy milliszekundumos) időbeli felbontásával, és képes megjeleníteni az egyes idegsejteket és kapcsolatokat.

Olyan módszereken is dolgoznak, amelyek nem invazív módon, időben és térben is pontosan aktiválják az idegsejteket, vagy akár egy idegsejt egy adott részét. Az egyik fotonokkal dolgozó megközelítés közvetlen, „kétfotonos” ingerlést alkalmaz, ezért „kétfotonos lézerszkennér mikroszkópiának” (TPLSM) nevezik.^[254] A módszer a térben egyetlen pontból álló fókusz hoz létre, nagyon nagy felbontást téve lehetővé ezzel. Olyan lézerimpulzusokat alkalmaz, melyek mindössze a másodperc milliomod részének milliárdod részéig (10^{-15} másodpercig) aktívak. Ezek segítségével érzékeli az egyes szinapszisok ingerületét az ép agyban, megmérve a sejten belüli kalciumfelhalmozódást, ami a szinaptikus receptorok aktiválását kíséri.^[255] Noha a módszer jelentős mennyiségű agyszövetet elpusztít, rendkívül magas felbontású képeket állít elő az egyes dendritüskékről és a működő szinapszisokról.

Ezt a technikát rendkívül pontos, sejten belüli sebészeti beavatkozásra is felhasználták. Eric Mazur fizikus és kollégái a Harvard Egyetemen bemutatták, hogy a rendszer képes precíz módosításokat végrehajtani sejteken, például át tud vágni egy idegsejtközi kapcsolatot, vagy el tud pusztítani egyetlen mitokondriumot (a sejt energiaforrását) anélkül, hogy megsértené a sejt többi részét. „A nap hevét hozza létre – mondja Mazur munkatársa, Donald Ingber –, de csak a másodperc billiárdod részéig, és nagyon kis helyen.”

A „multielektrodás felvétel” nevű eljárás több elektrodával méri nagyszámú neuron aktivitását, nagyon magas (milliszekundumnál kisebb) időbeli felbontással.^[256] A másodharmonikus keltés (SHG) elnevezésű nem invazív technika képes „a működésben lévő sejteket tanulmányozni”, mondja a

fejlesztésvezető, Daniel Dombeck, a Cornell Egyetem kutatója. Egy másik technika, az optikaikoherencia-tomográfia (OCT) koherens fényt (ugyanabba a fázisba rendezett fényhullámokat) felhasználva háromdimenziós holografikus képeket készít a sejtcsoportokról.

Szkennelés nanobotokkal. Noha a koponyát kívülről vizsgáló, nem invazív képalkotási eszközök rohamosan fejlődnek, a leghatékonyabb módszer az idegsejtek összes részletének a megfigyelésére mégis az lesz, ha belülről vizsgáljuk meg őket. A 2020-as évekre kivitelezhető lesz a nanobot-technológia, és az egyik legkiemelkedőbb alkalmazási területe az agyi képalkotás lesz. Mint korábban írtam, a nanobotok emberi vértest nagyságú (hét-tíz mikronnyi), vagy még annál is kisebb robotok.^[257] Milliárdszámra juthatnak el az összes agyi hajszálérbe, és közvetlen közélről mérhetik fel az idegsejtek összes fontos jellemzőjét. Nagy sebességű vezeték nélküli kapcsolattal fognak kommunikálni egymással és a külső adatgyűjtő számítógépekkel. (Más szóval a nanobotok és a számítógépek egy vezeték nélküli helyi hálózatba lesznek kötve.^[258])

Kulcsfontosságú technikai nehézség a nanobotok és a biológiai agy összekapcsolódásában a vér–agy-gát. A XIX. század végén a tudósok felfedezték, hogy ha kék festéket juttatnak egy állat vérkeringésébe, akkor a gerincvelő és az agy kivételével az állat összes szerve kék lesz. Ebből helyesen arra következtettek, hogy létezik egy gát, ami számos, a véráramba kerülő, potenciálisan ártalmas anyagtól megvédi az agyat, például baktériumoktól, hormonoktól, neurotranszmitterként is működő vegyi anyagoktól és egyéb mérgektől. Csak az oxigén, a glükóz és néhány más, kisebb molekula képes kijutni az erekből és bejutni az agyba.

A XX. század elején végzett boncolások során kiderült, hogy az agyban és egyéb idegrendszeri szövetekben található kapillárisok belső felületén valóban sokkal sűrűbben helyezkednek el behámsejtek, mint más szervek hasonló nagyságú ereiben. A későbbi kutatások kimutatták, hogy a vér–agy-gát egy összetett rendszer, amelyben kulcsokkal és jelszavakkal védett kapuk biztosítják a bejutást az agyba. Például felfedeztek két fehérjét, a zonulint és a zotot, amelyek reakcióba lépnek az agyi receptorokkal, és bizonyos helyeken ideiglenesen megnyitják a vér–agygátat. Ez a két fehérje hasonló szerepet játszik a vékonybélben, megnyitva azokat a receptorokat, amelyek lehetővé teszik a glükóz és más tápanyagok megemésztését.

Minden, az agy feltérképezésére szánt nanobot megtervezésénél tekintettel kell lenni a vér–agy-gátra. A következőkben ismertetek néhány stratégiát, amelyek működőképesek lehetnek a jövőben. A következő negyed században alighanem másokat is ki fognak még dolgozni.

- Magától értetődő taktika olyan kicsire tervezni a nanobotot, hogy átférjen a vér–agy-gáton, ám ez a legkevésbé praktikus megközelítés, legalábbis abból a szempontból, ahogy ma elképzeljük a nanotechnológiát. Egy nanobot legfeljebb húsz nanométer átmérőjű lehetne, azaz körülbelül akkora, mint száz szénatom. Ha erre a méretre kicsinyítenénk a nanobotot, azzal a funkcionalitását is komolyan korlátoznánk.
- Köztes megoldás lenne az, hogy a nanobot megmaradna a véráramban, de lenne egy karja, amelyet a vér–agy-gáton átnyújtva bejuttathatna az idegsejteket körülvéő sejtközi folyadékba. A nanobot így elég nagy maradhatna ahhoz, hogy kellő számítási és navigációs erőforrásokkal rendelkezzen. Mivel szinte az összes idegsejt két-három sejt mélységre fekszik a hajszálerektől, a karnak mindössze körülbelül ötven mikron hosszúnak kellene lennie.
- Egy másik megközelítés az, hogy a nanobotok a hajszálerekben maradnak, és nem invazív képalkotást végeznek. Például a Finkel és társai által tervezett képalkotó rendszer nagyon

nagy felbontással (elég naggyal ahhoz, hogy láthatóvá tegye az egyes kapcsolatokat), 150 mikron mélységig képes szkennelni, ami jóval nagyobb, mint amire szükségünk van. Nyilvánvaló, hogy egy ilyen optikai képalkotó rendszernek nagyon miniaturizálnak kellene lennie (a jelenleg létezőkhöz képest), az említett azonban CCD-érzékelőket használ, amelyeken alkalmazható ilyen méretcsökkentés.

- Egy másik fajta nem invazív képalkotó módszerben egy nanobotcsoport fókuszált jeleket bocsátana ki, hasonlóan a kétfotonos szkennerek jeleihez, egy másik csoport pedig venné az adást. A közbeeső szövetek topológiáját a vett jelre gyakorolt hatásuk alapján lehetne rekonstruálni.

- Egy Robert Freitas által felvetett megközelítésben a nanobot szó szerint áttörne a vér–agy-gáton. Lyukat ütne bele, kilépne az érből, majd helyrehozná az okozott sérülést. Mivel a nanobotot gyémántelrendezésű szénből is le lehetne gyártani, sokkal erősebb lenne, mint az élő szövet. „Ahhoz, hogy átgátszon a sejtek között – írja Freitas – egy sejtekben gazdag szöveten belül, a nanobot kénytelen megszakítani bizonyos minimális mennyiségű sejtközi kapcsolatot, melyek az útjában vannak. Ezután, a biointruzivitás minimalizálását szem előtt tartva, a nanobot helyreállítaná a kapcsolatokat maga mögött. Durva, de helytálló analógia lehet a járatát ásó vakondé.”^[259]

- Egy másik megközelítést a jelenkori rákkutatások ihlettek. A rákkutatókat nagyon érdekli az, hogy hogyan törhetnének át a vér–agy-gáton, hogy rákellenes anyagokat juttassanak el a tumorokhoz. A legújabb vér–agy-gát-kutatások kiderítették, hogy a gát számos tényező hatására nyílik meg, amelyek között szerepelnek fehérjék, mint fentebb már említettük; helyi magas vérnyomás; bizonyos anyagok magas koncentrációja; mikrohullámok és egyéb sugárzások; fertőzés és gyulladás. Vannak specializálódott folyamatok is, amelyek kiviszik az erekből a szükséges anyagokat, például a glükózt. Az is kiderült, hogy a mannit nevű cukor hatására a sűrűn egymás mellett elhelyezkedő belhámsejtek összehúzódnak, és ideiglenesen megnyitják a vér–agy-gátat. Ezeknek a mechanizmusoknak a felhasználásával sok kutatócsoport dolgozik olyan anyagokon, amelyek megnyitják a vér–agy-gátat.^[260] Noha ezek a kutatások elsősorban a rák gyógyítására irányulnak, hasonló módszerekkel megnyitható a gát az agyat feltérképező és a szellemi tevékenységünket felfokozó nanobotok előtt is.

- Megkerülhetjük a vérkeringést és a vér–agy-gátat azzal, hogy a nanobotokat azokba az agyterületekbe juttatjuk be, amelyek közvetlen kapcsolatban állnak az idegszövetekkel. Mint arra később kitérünk, az új idegsejtek az agykamrából vándorolnak az agy többi részébe. A nanobotok követhetnék ugyanezeket az útvonalakat.

- Rob Freitas számos technikát leírt, amelyekkel a nanobotok az érzékszervi jeleket figyelhetik.^[261] Ezek fontosak lesznek mind az agy inputjainak a visszafejtéséhez, mind a teljes bemerülést biztosító virtuálisvalóság-rendszerek megalkotásához az idegrendszeren belül.

– A hangjelek mérésére és érzékelésére Freitas „mobil nanoeszközöket [*javasol*]... melyek beúsznak a fül spirális artériájába, majd az elágazásait követve le a csigajáratba, és neurális monitorokként elhelyezkednek a spirális idegrostok és a Corti-féle szerv hámszövetébe belépő idegek (a cochleáris vagy hallóidegek) közelében, a spirális idegdúcon belül. Ezek a monitorok érzékelnék, rögzítenék vagy továbbítanák a kommunikációs hálózat többi nanoeszközének az összes hangot, amit az emberi fül érzékel”.

– A test „gravitáció-, forgás- és gyorsulásérzékeléséhez” Freitas olyan nanomonitorokat

képzeli el, amelyek „a félkör alakú járatokban lévő szőrsejtek idegvégződéseinél helyezkednek el”.

– „A kinezetikus érzékeléshez... a motoros idegsejteket lehetne megfigyelni, nyomon követve a végtagok helyzetét és mozgását, az egyes izmok tevékenységét, sőt akár irányítani is lehetne azokat.”

– „A szaglás és ízlelés idegi forgalmát nanoérzékelőkkel lehetne megfigyelni.”

– „A fájdalomingeret igény szerint rögzíteni vagy módosítani lehet, akár csak a bőrben elhelyezkedő érzékelőktől érkező... mechanikai és hőmérsékleti idegi impulzusokat.”

– Freitas rámutat, hogy a retinában nagyon sok parányi véredény található, „lehetővé téve a hozzáférést mind a fotoreceptor (pálcika, csap, bipoláris és ganglion), mind az integrátor idegsejtekhez”. A látóidegek jelzései másodpercenként több mint százmillió szintváltozáson mennek át, de ez a szintű jelfeldolgozás már ma is megoldható. Amint arra az MIT kutatója, Tomaso Poggio és mások rámutattak, még nem értjük a látóideg jeleinek a kódolását. Amint képesek leszünk a látóideg minden egyes különálló rostjának a jeleit érzékelni, nagymértékben fejlődni fog a jelek értelmezésére való képességünk. Jelenleg is intenzív kutatások folynak ezen a területen.

Ahogy azt később tárgyalni fogom, a testből érkező nyers jelek több szintű feldolgozáson mennek át, mielőtt összeállnának egy kompakt, dinamikus ábrázolássá a jobb és bal inzuláris kéregben, az agykéreg mélyén. A teljes bemerülést nyújtó virtuális valósághoz hatékonyabb lehet az *insula* (az agykéreg „sziget” nevű területe) már értelmezett jeleit módosítani, mint az egész testen végighaladó, feldolgozatlan jeleket.

Az agy feltérképezése abból a célból, hogy visszafejtsük működési elveit, könnyebb feladat, mint arra törekedni, hogy „feltöltsünk” belé egy adott személyiséget, amire később fogok kitérni (lásd *Az emberi agy feltöltése* című részt). Az agy visszafejtéséhez csak egy adott terület kapcsolatait kell eléggé feltérképeznünk ahhoz, hogy megértsük alapvető mintázatát. Nem szükséges megismernünk minden egyes kapcsolatot.

Amint megértjük egy terület idegi kapcsolási rajzát, egyesíthetjük ezt a tudást annak a részletes ismeretével, hogy hogyan működnek az egyes idegsejtek az adott területen. Noha egy adott agyterületen több milliárd idegsejt is lehet, az idegsejtek fajtáinak száma véges. Már eddig is jelentős előrelépés történt a különböző fajta idegsejtek és szinaptikus kapcsolatok mögött rejlő mechanizmusok megismerésében az *in vitro* (laboratóriumi körülmények között), illetve *in vivo*, például a kétfotonos képalkotással végzett tanulmányozásuk által.

A fenti forgatókönyvek olyan képességeket feltételeznek, amelyek legalább kezdeti stádiumaiban már ma is léteznek. Rendelkezésünkre áll a technológia, amely képes nagyon nagy felbontású képalkotással megmutatni egy adott agyterület minden egyes kapcsolatának a pontos mibenlétét, ha a berendezés kellő fizikai közelségbe került az idegsejtekhez. Ami a nanobotokat illeti, már négy nagy konferenciát szenteltek a vértest nagyságú, diagnosztikus és terápiás célú eszközöknek.^[262] Ahogy a 2. fejezetben tárgyaltam, a számítástechnika exponenciálisan csökkenő költségeit, illetve az elektronikus és mechanikus technológiák gyorsan csökkenő méretét és növekvő hatékonyságát előre tudjuk vetíteni a jövőre. Ezen előrejelzések alapján konzervatív becsléssel is a 2020-as évekre tehető a fentebb említett forgatókönyvek megvalósításához szükséges nanobot-technológia létrejötte. Amint a nanobotalapú képalkotás valósággá válik, végre ugyanabban a helyzetben leszünk, mint ma az áramkörtervezők: nanobotok formájában képesek leszünk nagyon érzékeny és nagyon nagy felbontású érzékelőket elhelyezni több millió vagy akár több milliárd helyen az agyban, és így lélegzetelállító részletességgel figyelhetjük meg az élő agy működését.

Az agy modellezése

„Ha egy varázslattal lekicsinyítenének minket, és beletennének valakinek az agyába, miközben az illető gondolkodik, látnánk az összes szivattyút, szelepet, fogaskereket és emeltyűt működés közben, mechanikai szempontból tökéletesen le tudnánk írni a működésüket, s így teljes mértékben le tudnánk írni az agy működési folyamatait. Ám ez a leírás semmit sem árulna el a gondolkodásról! Nem lenne benne semmi más, csak szivattyúk, szelepek és emeltyűk leírása!”

(G. W. Leibniz [1646–1716])

„Hogyan... fejezik ki a tudományterületek az alapelveiket? A fizikusok olyan szakkifejezésekkel, mint a foton, elektron, kvark, kvantum-hullámfüggvény, relativitás és energiamegmaradás. A csillagászok olyanokkal, mint a bolygók, csillagok, galaxisok, Hubble-eltolódás és fekete lyukak. A termodinamikával foglalkozók olyanokkal, mint az entrópia, első főtétel, második főtétel és Carnot-ciklus. A biológusok olyanokkal, mint a filogénia, ontogénia, DNS és enzimek. Tulajdonképpen mindegyik kifejezés egy egész történetet takar! A tudományterületek alapelvei tulajdonképpen a tudományterület alkotórészeinek szerkezetéről és viselkedéséről szóló, egymásra szövőődő történetek.”

(Peter J. Denning,

az Association for Computing Machinery egykori elnöke,

a Great Principles of Computing [A számítástechnika nagy elvei] című írásában)

Fontos, hogy a megfelelő szinten építsünk modelleket az agyról. Ez természetesen igaz minden tudományos modellre. Noha a kémia elméletileg a fizikán alapul, és teljes mértékben levezethető a fizikából, a gyakorlatban ez kényelmetlen és kivitelezhetetlen lenne. A kémia ezért saját szabályokat és modelleket használ. Hasonlóképpen, elméletileg a termodinamika törvényeit is le kellene tudnunk vezetni a fizikából, ez azonban korántsem egyértelmű folyamat. Amint elég részecskénk van ahhoz, hogy valamit gáznak nevezzünk, ne pedig egy halom részecskének, nehézkessé válik minden egyes részecske kölcsönhatásait egyenletekkel kiszámítani, ezzel szemben a termodinamika törvényei rendkívül jól alkalmazhatók. Egyetlen molekula kölcsönhatásai a gázban reménytelenül bonyolultak és kiszámíthatatlanok, de maga a több billió molekulából álló gáz sok előre jelezhető tulajdonsággal bír.

Hasonlóképpen, a kémiában gyökerező biológia is a saját modelljeit használja. Gyakran felesleges magasabb szintű jelenségeket az alacsonyabb szintű rendszereket leíró eszközökkel kifejezni, bár teljesen meg kell értenünk az alacsonyabb szintet, mielőtt továbblépünk a magasabbra. Például ahhoz, hogy egy állat bizonyos genetikai vonásait szabályozni tudjuk a magzati DNS manipulálásával, nem feltétlenül kell ismernünk a DNS összes biokémiai mechanizmusát, a DNS-molekulán belüli atomok kölcsönhatásairól nem is beszélve.

Az alacsonyabb szint gyakran sokkal bonyolultabb. Például egy hasnyálmirigysejt rendkívül bonyolult a biokémiai funkciói szempontjából (melyek többsége az összes emberi sejtben, egy részük pedig minden élő sejtben megtalálható). A hasnyálmirigy milliárdnyi sejtje működésének, az inzulin és az emésztőenzimek szabályozásának a modellezése viszont ha nem is egyszerű, sokkal kevésbé

bonyolult, mint egyetlen sejt modelljének a megalkotása.

Ugyanez igaz az agy megértésének és modellezésének a szintjeire, a szinaptikus reakciók fizikájától kezdve az információk idegsejtszoportok általi átalakításáig. Azoknál az agyterületeknél, amelyek a részletes modelljét már sikerült elkészítenünk, hasonló jelenséget figyelhetünk meg, mint a hasnyálmirigysejtek esetében. A modellek bonyolultak, de még mindig egyszerűbbek, mintha egyetlen sejt vagy akár egyetlen szinapszis matematikai leírásai lennének. Mint korábban már tárgyaltuk, ezek a területspecifikus modellek ráadásul sokkal kisebb számítási kapacitást igényelnek, mint amekkora elméletileg az összes sejt és szinapszis számítási kapacitásából következne.

Gilles Laurent, a Kaliforniai Műszaki Egyetem munkatársa így ír: „A legtöbb esetben egy rendszer viselkedésére rendkívül nehéz következtetni az alkotórészei viselkedéséből... Az idegtudomány... olyan rendszerek tudománya, amelyekben szükségesek, de nem elégségesek az elsőrendű, helyi leíró sémák.” Az agy visszafejtése a fentről lefelé és lentől felfelé építkező modellek és szimulációk folyamatos finomítása révén, a leírások és modellek minden szintjének állandó javítása során fog előrehaladni.

Egészen a közelmúltig az idegtudományt rendkívül egyszerű, az érzékelő- és képzőberendezéseink durvasága által behatárolt modellek jellemezték. Emiatt sok kutató kételkedett abban, hogy gondolkodási folyamataink egyáltalán lehetővé teszik-e azt, hogy megértsük saját magunkat. Peter D. Kramer írja: „Ha az elme elég egyszerű lenne ahhoz, hogy megértsük, mi is túl egyszerűek lennénk ahhoz, hogy megértsük.”^[263] Korábban idéztem már Douglas Hofstadtert, aki egy zsiráf agyához hasonlította az agyunkat. A zsiráf agya nem sok mindenben különbözik az emberétől, mégis nyilvánvaló, hogy nem rendelkezik azon képességgel, hogy megértse a saját működését. Mindazonáltal a különböző szintű, igen részletes modellek közelmúltbeli megalkotása – az olyan idegrendszeri építőelemekéitől kezdve, mint a szinapszis, egészen a nagy idegrendszeri területekig, mint az agykéreg – azt bizonyítja, hogy pontos matematikai modelleket készíteni az agyunkról, majd számítástechnikai eszközökkel szimulálni ezeket a modelleket nehéz, de megoldható feladat, amint elérhetővé válnak a megfelelő adatfeldolgozó eszközök. Noha az idegtudományban hosszú múltra tekintenek vissza a modellek, csak a közelmúltban váltak elég átfogóvá és részletessé ahhoz, hogy lehetővé tegyék, hogy a rájuk épülő szimulációk olyanok legyenek, mint a valódi agykísérletek.

Szubneurális modellek: szinapszisok és dendrituskék

Az Amerikai Pszichológiai Társaság 2002-i éves konferenciáján Joseph LeDoux, a New York-i Egyetem kutatója ezt mondta beszédében:

„Ha az emlékeink formálnak minket azzá, akik vagyunk, és az emlékezet az agy egyik funkciója, akkor a szinapszisok – az interfészek, amelyeken keresztül az idegsejtek kommunikálnak egymással és azokkal a fizikai struktúrákkal, amelyekben az emlékek tárolódnak – az én alapvető egységei... A szinapszisok nagyon alacsonyan helyezkednek el az agy felépítésének hierarchiájában, szerintem mégis nagyon fontosak... Az én az agy egyes alrendszerének az összessége, mely alrendszerek mindegyikének megvan a saját típusú »emlékezet«, kiegészül az alrendszerek közötti bonyolult kölcsönhatásokkal. A szinapszisok rugalmassága nélkül, a változásra való képességük nélkül, miközben jeleket továbbítanak egyik idegsejttől a másikig, lehetetlenné válnának az alrendszerek változásai, amikre szükség van a tanuláshoz.”^[264]

Noha az első modellek az idegsejtet tekintették az információ-átalakítás alapvető egységének, a trend hamarosan szubcelluláris alkotórészei jelentőségének hangsúlyozása felé fordult. Anthony J. Bell számítástechnikai idegtudós például így érvel:

„Molekuláris és biofizikai folyamatok szabályozzák az idegsejtek érzékenységét a bejövő impulzusokkal szemben (mind a szinaptikus hatékonyságot, mind a posztzinaptikus válaszképességet), az idegsejt ingerelhetőségét az impulzusok létrehozására, a lehetséges impulzussorozatok, amiket létre tud hozni, és az új szinapszisok kialakulásának valószínűségét (a dinamikus újraszerveződést), hogy csak négyet említsek a szubneurális szint legnyilvánvalóbb kölcsönhatásai közül. Emellett a transzneurális tömeghatások, mint a helyi elektromos mezők és a nitrogén-monoxid sejthártyán keresztüli diffúziója szintén befolyásolja a koherens idegsejt-kisülést és a sejtek energiaellátását (a vérkeringést), mely utóbbi egyenes arányban áll az idegsejtek aktivitásával. És még folytathatnám a felsorolást. Hiszem, hogy aki komolyan tanulmányozza a neuromodulátorokat, ioncsatornákat vagy szinaptikus mechanizmusokat, és őszinte, az elveti az idegsejt szintjét mint különálló számítási szintet, még ha hasznos leíró szintnek találja is.”^[265]

Egy valódi agyi szinapszis valóban sokkal összetettebb, mint ahogy azt a klasszikus McCulloch–Pitts-modell leírja. A szinaptikus választ számos tényező befolyásolja, köztük több, különböző ionpotenciálok (feszültségek), neurotranszmitterek és neuromodulátorok által szabályozott csatorna. Az elmúlt húsz évben jelentős haladás történt a neuronok, dendritek, szinapszisok és a tüzelési sorozatok (az aktivált neuronok impulzusai) által megjelenített információk viselkedése mögött rejlő matematikai képletek megalkotásában. Peter Dayan és Larry Abbott nemrég készített egy összefoglalót az ismert nemlineáris differenciálegyenletekről, amelyek több ezer kísérleti tanulmányból származó, széles körű tudásanyagot írnak le.^[266] Az idegsejt sejtestjére, a szinapszisokról és az idegsejtek előrecsatolt hálózatára, amilyen a retinában és a látóidegben is található, illetve számos egyéb fajta idegsejt a viselkedésére már vannak megalapozott modelljeink.

A szinapszisok működésére irányuló figyelem Hebb úttörő munkásságára vezethető vissza. Hebb tette föl a kérdést, hogy hogyan működik a rövid távú emlékezet. A rövid távú emlékezettel összekapcsolt agyterület a prefrontális kéreg, bár ma már tudjuk, hogy egyéb, alaposan tanulmányozott idegrendszeri hálózatokban is azonosítottak különféle rövid távú információtárolást.

Hebb nagyrészt a szinapszisok állapotváltozásaira összpontosított, melyek során megerősítették vagy gátolták a beérkező jelzéseket, illetve a vitatottabb reverberációs körre, amelyben az idegsejtek folytonos körben sülnek ki.^[267] Hebb egy másik elmélete magában az idegsejtben feltételezett állapotváltozást – azaz a sejt szómájának (testének) az emlékező funkcióját – hangsúlyozta. A kísérleti adatok alapján mindegyik modell lehetségesnek mondható. A klasszikus hebbi szinaptikus emlékezet és reverberációs emlékezet működésében el kell telnie valamennyi időnek, mielőtt a rögzített információ felhasználható lenne. Az *in vivo* kísérletek kimutatták, hogy legalábbis az agy bizonyos területein megfigyelhetőek olyan idegi reakciók, amelyek túl gyorsak ahhoz, hogy ezek a standard tanulási modellek vonatkozhatnának rájuk, és ennél fogva csak a sejtest tanulása által kiváltott változásai okozhatják őket.^[268]

Egy másik lehetőség, amire Hebb közvetlenül nem utalt, a magukban az idegsejti kapcsolatokban bekövetkező valós idejű változás. A legújabb képalkotási eredmények dendrittűskék és új szinapszisok gyors növekedését mutatják, ezt tehát fontos mechanizmusnak kell tekinteni. A kísérletek

szinaptikus szinten is számos olyan tanulási viselkedésre derítettek fényt, amelyek túlmutatnak az egyszerű hebbi modelleken. A szinapszisok képesek gyorsan megváltoztatni az állapotukat, de aztán az inger fenntartása közben, vagy egyes esetekben az inger megszűnésekor, vagy sok más variációban, lassan elkezdenek elpusztulni.^[269]

Noha a mai modellek sokkal bonyolultabbak, mint a Hebb által felvázolt egyszerű szinapszismodellek, a megérzései nagyrészt helyesnek bizonyultak. A szinapszisok általa feltételezett rugalmassága mellett a jelenlegi modellekben helyet kapnak olyan globális folyamatok is, amelyek szabályozó funkciót biztosítanak. Például a szinaptikus skálázás megakadályozza, hogy a szinapszisok potenciálja nullára csökkenjen (és így ne tudjanak megnőni a szorzó folyamatok révén), vagy túl magassá váljon és uralja a hálózatot. Az *in vitro* kísérletek kimutatták a szinaptikus skálázást tenyésztett neocortex, hippokampusz és gerincvelő idegsejtekben.^[270] Más mechanizmusok a tüzelés időzítésére és a potenciál szinapszisok közötti eloszlására érzékenyek. A szimulációk bebizonyították, hogy ezek a közelmúltban felfedezett mechanizmusok képesek javítani a tanulást és a hálózat stabilitását.

A legizgalmasabb új fejlemény a szinapszis megismerésében az, hogy a szinapszisok topológiája és a létrehozott kapcsolataik folyamatosan változnak. A szinaptikus kapcsolatok gyors változását legelőször egy innovatív képalkotó rendszer segítségével pillanthattuk meg, amelyhez egy olyan genetikailag módosított állatra volt szükség, amelynek az idegsejtjei zöld fényt bocsátanak ki magukból. A rendszer képes felvételeket készíteni az élő idegszövetről, és elég nagy a felbontása ahhoz, hogy ne csak a dendriteket (az idegsejtek közötti kapcsolatokat), hanem a tüskéket is érzékelje: azokat az apró kitüremkedéseket, amik a dendritekből nőnek ki és szinapszisokat hozhatnak létre.

Karel Svoboda neurobiológus és munkatársai a Long Island-i Cold Spring Harbor Laboratóriumban egereken használták ezt a képalkotó rendszert, hogy megvizsgálják azt a neuronhálózatot, amely az egér bajuszától érkező információkat elemzi. A kutatás bámulatos betekintést nyújtott a neurális tanulás folyamatába. A dendritek folyamatosan új tüskéket növesztettek. Ezek többsége csak egy-két napig maradt meg, de időnként akadt egy-egy stabil is. „Úgy véljük, a szemünk előtt zajló folyamat fontos szerepet játszhat az idegrendszer formálhatóságában, hiszen az újonnan kialakuló tüskék kinyúlnak és megszondázzák a szomszédos idegsejtek preszinaptikus mintázatait – mondta Svoboda. – Ha egy adott kapcsolat kedvező, azaz kívánatos agyi átalakulást tükröz, akkor ezek a szinapszisok stabilizálódnak és maradandóbbakká válnak. Ám a szinapszisok többsége nem a megfelelő irányba fejlődik, és hamarosan felszívódik.”^[271]

Egy másik megfigyelt konzisztens jelenség az, hogy az idegsejti reakciók mérséklődnek az idő múlásával, ha a sejtet érő stimulus ismétlődik. Ez az alkalmazkodás az új mintázatú stimulusoknak biztosítja a legnagyobb prioritást. Wen-Biao Gan, a New York-i Orvosi Egyetem kutatója hasonló kísérleteket végzett felnőtt egerek vizuális cortexének idegsejti tüskéin, és megállapította, hogy ez a tüskemechanizmus hosszú távú emlékeket is tárolhat: „Mondjuk, egy tízéves gyerek ezer kapcsolatot használ egy adott információ tárolására. Nyolcvanéves korában a kapcsolatok negyede még mindig meglesz, akármennyire is megváltoznak a dolgok. Ezért tudunk még ma is emlékezni a gyermekkori élményeinkre.” Gan így folytatja: „Az alapötletünk az volt, hogy tanulás, memorizálás közben nem kell sok új szinapszist létrehozni és a régiektől megszabadulni. Mindössze a már létező, a rövid távú tanúlással és emlékezéssel foglalkozó szinapszisok erejét kell módosítani. Ugyanakkor valószínű, hogy a hosszú távú emlékek kialakulásához új szinapszisok keletkeznek és régiak szűnnek meg.”^[272]

Az emlékek azért maradhatnak meg még úgy is, hogy a kapcsolatok háromnegyede eltűnik, mert a kódolási eljárás nagyon hasonlónak tűnik a hologramokéhoz. A hologramokban az információ nagy

kiterjedésű, diffúz mintázatokban tárolódik. Ha egy hologram háromnegyed részét elpusztítjuk, maga a kép ép marad, bár a felbontása a negyedére csökken. Pentti Kanerva, a Redwood Idegtudományi Intézet kutatója támogatja azt az elképzelést, hogy az emlékek dinamikusan eloszlanak egy-egy idegrendszeri területen. Ez megmagyarázná, miért maradnak meg a régi emlékek, s ugyanakkor miért tűnnek „megfakultnak” – azért, mert csökkent a felbontásuk.

Neuronmodellek

A kutatók azt is felfedezték, hogy az egyes idegsejtek egyedi felismerő feladatokat látnak el. Csirkéken végzett kísérletek során azonosították azokat az agytörzsi idegsejteket, amelyek a két fülbe eltérő időpontban érkező hangok közötti időkülönbséget érzékelik.^[273] Az egyes idegsejtek különböző időkülönbségre reagálnak. Noha számos bonyolult rendellenesség található ezen idegsejtek (és a hálózatok, amelyektől függenek) működésében, azt, amit tulajdonképpen csinálnak, könnyű leírni, és lemásolni sem lenne nehéz. Scott Makeig, a Kaliforniai Egyetem idegtudósa szerint „a legújabb neurobiológiai eredmények arra utalnak, hogy a pontosan szinkronizált idegsejt-inputoknak fontos szerepük van a tanulásban és az emlékezésben.”^[274]

Elektronikus neuronok. Egy, a Kaliforniai Egyetem Nemlineáris Tudományok Intézetében a közelmúltban elvégzett kísérlet bebizonyította, hogy az elektronikus idegsejtek képesek lehetnek pontosan emulálni a biológiai idegsejteket. Az idegsejtek (legyenek bár biológiaiak vagy másmilyenek) kiváló példát kínálnak arra, amit gyakran kaotikus számítástechnikának neveznek. Minden egyes idegsejt gyakorlatilag előre nem jelezhető módon viselkedik. Amikor egy egész idegsejthálózat valamilyen bemenetet kap (a külvilágból vagy egy másik idegsejthálózattól), a sejtek közötti jelforgalom először véletlenszerűnek és rendszertelennek tűnik. Idővel, általában egy másodperc törtrésze alatt, az idegsejtek kaotikus kölcsönhatása lecsillapodik, és kialakul egy stabil kisülési mintázat. Ez a mintázat jelenti a neurális hálózat „döntését”. Ha egy neurális hálózat mintázatfelismerő feladatot hajt végre (márpedig az emberi agy tevékenységének nagy részét ilyen feladatok teszik ki), akkor a kialakuló mintázat jelenti a helyes felismerést.

A San Diegó-i kutatók a következő kérdést tették fel: képesek-e az elektronikus neuronok ilyen kaotikus táncot lejteni a biológiai neuronokkal? Egy egyszerű hálózatban a mesterséges neuronokat languszták valódi idegsejtjeivel kötötték össze, és a hibrid biológiai-nem biológiai hálózat ugyanúgy viselkedett (azaz a kaotikus kölcsönhatást stabil mintázat kialakulása követte), és ugyanolyan eredményeket hozott, mint egy teljesen biológiai neurális hálózat. A biológiai idegsejtek lényegében elfogadták elektronikus társaikat. Ez pedig arra utal, hogy ezeknek a neuronoknak a kaotikus matematikai modellje elég pontos volt.

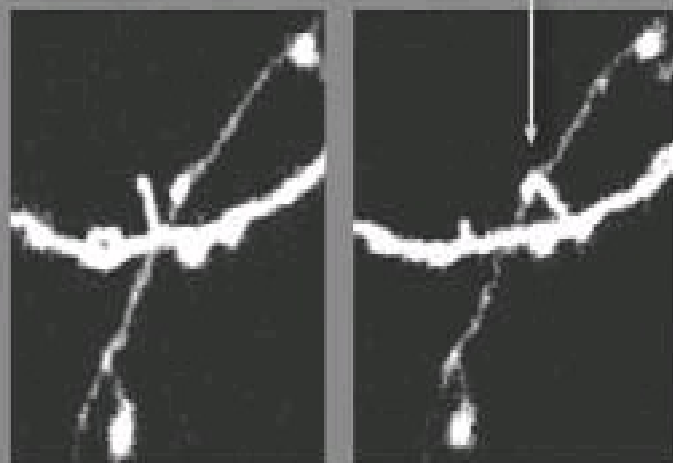
Az agy rugalmassága

1861-ben Paul Broca francia idegsebész összepárosított bizonyos sérült vagy sebészi úton eltávolított agyterületeket bizonyos elvesztett képességekkel, például a finommotoros képességgel vagy a nyelvi készségekkel. A tudósok több mint egy évszázadon keresztül úgy hitték, hogy ezek a területek sajátos, egyedi feladatok ellátására specializálódtak. Noha egyes agyterületek valóban főleg bizonyos fajta képességekért felelősek, ma már tudjuk, hogy ezek az összefüggések megváltozhatnak agyi sérülések, például az agyvérzés hatására. D. H. Hubel és T. N. Wiesel 1965-ös, mára klasszikussá vált tanulmányában kimutatta, hogy az idegrendszer sérülése, például egy szélütés után az

agy kiterjedten és mélyrehatóan újra tudja szervezni önmagát. [\[275\]](#)

Mi több, egy adott területen a kapcsolatok és szinapszisok elrendezését közvetlenül meghatározza az, hogy milyen erőteljesen és gyakran használt az adott terület. Mivel az agy szerkezetét kutató képalkotó módszerek elérték azt a felbontást, hogy érzékelni tudják a dendrittüskék kinövését és az új szinapszisok kialakulását, ma már láthatjuk, hogyan növekszik és szó szerint a gondolatainkat követve hogyan változik az agyunk. Ez pedig új jelentésárnyalatokkal ruházza fel Descartes szállóigéjét: „Gondolkodom, tehát vagyok”.

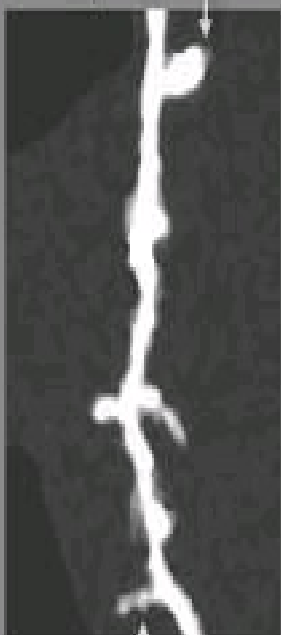
A dendritekről *in vivo* készült felvétel egy lehetséges új szinapszis kialakulását mutatja



24 órával később

Idegsejtek dendritjeinek
in vivo felvételei
Tüskék és szinapszisok
kialakulása

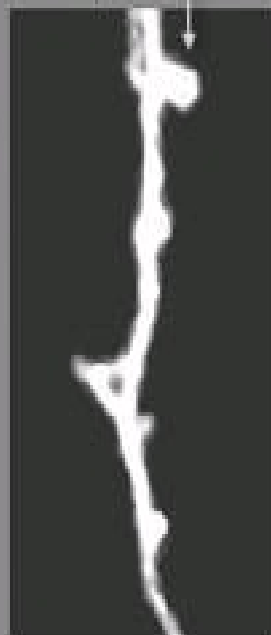
4. nap



5. nap



6. nap



átmeneti
túske

stabil
túske

félig stabil túske

Michael Merzenich és munkatársai a Kaliforniai Egyetemen egy kísérlet során a majmok táplálékát úgy helyezték el, hogy az állatoknak ügyesen kellett használniuk az egyik ujjukat, hogy elérhessék azt. A kísérlet előtt és után készített agyi felvételek arról tanúskodnak, hogy az ujj mozgatásáért felelős agyterületen drámai módon megnőtt az idegsejtek közötti kapcsolatok és szinapszisok száma.

Edward Taub az Alabamai Egyetemen az ujjaktól érkező tapintási jeleket kiértékelő agykérgi területet tanulmányozta. Zenével nem foglalkozókat és, húros hangszereken játszó tapasztalt zenészeket összehasonlítva nem talált különbségeket a jobb kéz ujjaiért felelős agyterületeken, a bal kéz ujjaiért felelős területeken viszont óriási eltéréseket tapasztalt. Ha az érintés elemzésére szánt agyszövet mennyiségével arányos méretben ábrázolnák a kezeket, a zenészek bal kezének ujjaihoz tartozó területek (amelyekkel lefognák a húrokat) óriásiak lennének. Noha a különbség nagyobb volt azoknak a zenészeknek az esetében, akik még gyerekkorukban kezdtek el húros hangszereken gyakorolni, „az agy még akkor is átszervezi magát – jegyzi meg Taub –, ha valaki negyvenévesen kezd el hegedülni”.^[276]

Hasonló eredmények születtek egy Paula Tallal és Steve Miller által a Rutgers Egyetemen kifejlesztett szoftver, a diszlexiás diákokat segítő Fast ForWord kiértékelése során. A program felolvas egy szöveget a gyerekeknek, de a rövid zárhangokat, mint a „b” és a „p” lassabban ejti, azon megfigyelésre alapozva, hogy sok diszlexiás diák nem képes meghallani ezeket a hangokat, ha gyorsan mondják őket. Az ekképpen módosított beszéddel történő felolvasás bizonyítottan segített a diszlexiás gyerekeknek megtanulni olvasni. John Gabrieli, a Stanford Egyetem kutatója fMRI-vizsgálatok során megállapította, hogy az agy bal oldali prefrontális területe, amelyet a beszédértéssel szoktak összefüggésbe hozni, valóban megnövekedett és nagyobb aktivitást mutatott a programot használó diszlexiás diákok esetében. „Az ember abból építi fel az agyát, amit bemenetként kap”, mondja Tallal.

Még csak fizikai cselekvéssel sem muszáj kifejezni az embernek a gondolatait ahhoz, hogy saját maga újraszervezésre ösztökélje az agyát. Dr. Alvaro Pascual-Leone a Harvard Egyetemen önkéntesek agyáról készített felvételeket azelőtt és azután, hogy egy egyszerű zongoradarabot gyakoroltak. Az önkéntesek motoros agykérge a gyakorlás közvetlen eredményeként megváltozott. Ezután egy másik csoportot arra kért, hogy csak gondoljanak a gyakorlásra, anélkül, hogy egyetlen izmukat is megmozdítanák. Ez is ugyanolyan észrevehető változást hozott létre a motoros kéreg hálózatában.^[277]

A vizuális-térbeli viszonyok tanulásának legújabb fMRI-s vizsgálatai kimutatták, hogy az idegsejtek közötti kapcsolatok képesek akár egyetlen tanulóssal töltött óra alatt is gyorsan megváltozni. A kutatók változásokat fedeztek fel a hátsó koponyafali kéreg sejtjeiben, az úgynevezett „dorzális” pályán (ami a vizuális ingerek helyéről és térbeli jellemzőiről tartalmaz információkat), és a hátsó felső temporális agykéreg sejtjeiben, a „ventrális” pályán (különböző absztrakciós szintekhez társított állandó vonásokat tartalmaz);^[278] s ami igen fontos, a változás sebessége egyenes arányban állt a tanulás sebességével.^[279]

A Kaliforniai Egyetem kutatói a rövid távú és a hosszú távú emlékek kialakulása közötti különbségek terén számoltak be egy kulcsfontosságú felismerésről. Egy nagy felbontású képalkotó eljárást alkalmazva képesek voltak nyomon követni a kémiai változásokat a hippokampusz szinapszisaiban, azon az agyterületen, amelyet a hosszú távú emlékek kialakulásával szokás társítani.^[280] Felfedezték, hogy amikor egy sejtet először ért stimulus, a sejttesten belül egy aktin nevű, a sejtszerkezet kialakításáért felelős vegyület kezdett áramlani azok felé az idegsejtek felé, amelyekkel a szinapszis kapcsolatban állt. Ezzel párhuzamosan a szomszédos sejtekben lévő aktin eltávolodott az aktivált sejthez közeli sejtrészekből. Mindazonáltal ezek a változások mindössze

néhány percig maradtak fenn. Ha azonban a stimulációt elég sokszor megismételték, akkor jelentősebb, maradandó változás következett be.

„A rövid távú változások egyszerűen a velejárói annak, ahogy az idegsejtek közönséges esetben beszélgetnek egymással”, mondta Michael A. Colicos kutatásvezető.

„Az idegsejtekben csak akkor jönnek létre hosszú távú változások, ha egy órán belül négyszer stimuláljuk őket. A szinapszis ekkor meghasad és új szinapszisok jönnek létre, olyan maradandó változást okozva, ami feltehetőleg az egyén élete végéig megmarad. Az emberi emlékezettel ezt úgy lehetne párhuzamba állítani, hogy amikor egyszer látunk vagy hallunk valamit, akkor néhány percre talán megragad az elménkben. Ha nem fontos, akkor elhalványul, és tíz perccel később már elfelejtjük. Ha azonban újra látjuk vagy halljuk, és ez újra meg újra bekövetkezik a következő egy órában, akkor sokkal hosszabb ideig fogunk emlékezni rá. A sokszor megismételt dolgokra pedig akár egész életünkben is emlékezhetünk. Ha fogunk egy axont és létrehozunk két új kapcsolatot, azok nagyon stabilak lesznek, és semmi okunk azt feltételezni, hogy el fognak tűnni. Az ilyen változásról úgy véljük, hogy az egész életen át megmarad.”

„Olyan, mint egy zongoralecke – mondja Yukiko Goda biológiai professzor, a tanulmány egyik társszerzője. – Ha valaki újra és újra eljátszik egy darabot, az beépül az emlékezetébe.” Hasonlóképpen, S. Lowel és W. Singer idegtudósok a *Science* egyik cikkében arról számoltak be: bizonyítékot találtak arra, hogy a vizuális cortexben gyorsan és dinamikusan jönnek létre új idegsejtközi kapcsolatok. Donald Hebb szavaival élve ezt úgy jellemezték, hogy „ami együtt sül ki, az együtt is marad.”^[281]

Egy másik, az emlékezet kialakulásával kapcsolatos felfedezést egy, a *Cell* magazinban megjelent tanulmányban közöltek. A kutatók megállapították, hogy a CPEB-fehérje megváltoztatja az alakját a szinapszisokban, hogy megőrizze az emlékeket.^[282] A meglepetést az okozta, hogy a CPEB prion állapotában hajtja végre ezt az emlékező funkcióját.

„Egy ideje már elég sokat tudunk arról, hogyan működik az emlékezet, de nem volt tiszta fogalmunk arról, mi az alapvető tárolóeszköze – mondta Susan Lindquist, a tanulmány társszerzője, a White Orvosbiológiai Kutatóintézet igazgatója. – Ebből a kutatásból következtethetünk rá, mi lehet a tárolóeszköz... de nagyon meglepő a következtetés, hogy egy prionszerű tevékenységnek is köze lehet hozzá... Ez... arra utal, hogy a prionok nem pusztán a természet furcsaságai, hanem talán alapvető folyamatokban vesznek részt.” Ahogyan arról a 3. fejezetben írtam, a mérnökök szintén hatékony eszközöknek találták a prionokat az elektronikus memóriák építése során.

Az agyi képalkotással foglalkozó kutatások sok mindent megállapítottak a felesleges és nemkívánatos emlékeket gátló mechanizmusokról is, amivel bizonyára nagy örömet szereznének Sigmund Freudnak.^[283] A Stanford Egyetem tudósai fMRI-t használva arra kérték a vizsgált személyeket, hogy próbáljanak meg elfelejteni korábban memorizált információkat. A kísérlet során a frontális kéreg egyes területei, amelyeket az emlékek elnyomásával szokás összefüggésbe hozni, magas szintű aktivitást mutattak, miközben a hippocampus, az emlékezettel társított terület, viszonylag inaktív maradt. Ezek az eredmények „alátámasztják egy aktív felejtési folyamat létezését, és megalapoznak egy neurobiológiai modellt, ami alapján tovább lehet vizsgálni a motivált felejtést”, írta John Gabrieli, a Stanford Egyetem pszichológiai professzora a munkatársaival közös cikkében. Gabrieli megjegyezte: „A nagy hír az, hogy megmutattuk, hogyan blokkolja az emberi agy a

nemkívánatos emlékeket, hogy létezik ilyen mechanizmus, és biológiai alapú. Ezzel kizárható, hogy nincs semmi az agyban, ami elnyomna egy emléket – hogy ez csak félrevezető elképzelés volt.”

Amellett, hogy új kapcsolatokat hoz létre az idegsejtek között, az agy új idegsejteket is előállít idegi őssejtekből, amelyek szaporodnak, hogy egy állandó készletet fenntartsanak magukból. A szaporodás során néhány ősejtől „neurális prekursorok” válnak, amelyek kétfajta támogató sejté, asztrocitákká és oligodendrocitákká, illetve idegsejteké fejlődnek. Az idegsejtek ezután még különböző fajtákká alakulnak. Ez a differenciálódás azonban nem következhetne be, ha az őssejtek nem távolodnának el az agyi kamrákban lévő forrásuktól. Az utat az idegsejteknek mindössze körülbelül a fele teszi meg sikeresen, ami hasonló a várandósság és a korai gyermekkor során lezajló folyamathoz, amelynek során az agy első idegsejtjeinek csak egy része marad életben. A tudósok a betegségek vagy balesetek miatti agyi sérülések gyógyítása érdekében úgy remélik megkerülni az idegsejtek vándorlását, hogy közvetlenül a megcélzott területekre fecskendezik be az őssejteket, illetve olyan gyógyszereket fejlesztenek ki, amik elősegítik a neurogenesis (az új idegsejtek kialakulása) folyamatát.^[284]

Fred Gage, G. Kempermann és Henriette van Praag, a Salk Biológiai Kutatóintézet tudósai kimutatták, hogy a neurogenesis valóban serkenti a tapasztalataink. Amikor egereket költöztettek át steril, sivár ketrecekbe érdekes, stimuláló környezetbe, a hippocampusuk területén hozzávetőlegesen megkétszereződött a sejtosztódások száma.^[285]

Az agyterületek modellezése

„Az a legvalószínűbb, hogy az emberi agy nagy vonalakban sok, viszonylag kicsi elosztott rendszerből áll, melyeket az embriológiai fejlődés összetett rendszerbe rendez, és amelyeket részben (de csak részben) később hozzáadott, soros, szimbolikus rendszerek irányítanak. Ám ezek a háttérben zajló munka nagy részét végző szubszimbolikus rendszerek jellegükénél fogva kénytelenek megakadályozni az agy összes többi részét abban, hogy túl sokat tudjanak a működésükről. Ez már önmagában is segíthet megmagyarázni, hogy lehet az, hogy az emberek olyan sok mindent csinálnak, mégis olyan hiányos elképzeléseik vannak arról, hogyan is csinálják valójában a dolgokat.”

(Marvin Minsky és Seymour Papert^[286])

„A józan ész nem egyszerű dolog, hanem nehezen megszerzett, gyakorlati tapasztalatok összessége – egy életen át megtanult szabályok és kivételek, hajlamok és tendenciák, fékek és egyensúlyok sokaságának a rendszere.”

(Marvin Minsky)

Az egyes agyterületek szerveződésének rugalmasságát kimutató felfedezések mellett a kutatók egyre gyorsabban készítik el az agy területeinek részletes modelljeit is. Ezek a neuromorf modellek és szimulációk alig maradnak le azoknak az információknak a hozzáférhetősége mögött, amelyeken alapulnak. Az idegsejtek tanulmányozásából származó részletes adatok és az agyi képalkotó eljárásokkal a kapcsolatokról szerzett adatok hatékony modellekké és működő szimulációkká alakításának gyors sikere rácsfol a saját agyunk megértésére való inherens képességünk kapcsán gyakran hangoztatott szkepticizmusra.

Az emberi agy működésének nemlinearitásról nemlinearitásra, szinapszisról szinapszisra történő modellezése általában véve felesleges. Az emlékeket és képességeket tároló területek minden egyes idegsejtjének és kapcsolatának a szimulálása (például a kisagy esetében) valóban felhasználja a

részletes sejtszintű modelleket. Ám a szimulációk még ezeknek a területeknek az esetében is sokkal kevésbé számításgényesek, mint ahogy az az összes idegrendszeri összetevőből következne. Ez igaz a lentebb bemutatásra kerülő kisagy-szimulációra is.

Noha minden egyes idegsejt szubneurális részében rengeteg apró komplexitás és nemlinearitás, az agy több billió kapcsolata mögött pedig kaotikus, félig véletlenszerű kapcsolási rajz rejlik, az elmúlt húsz évben jelentős előrelépés történt az ilyen adaptív, nemlineáris rendszerek modellezésének a matematikájában. Általában nem szükséges megőrizni minden egyes dendrit alakját és minden egyes idegsejtközi kapcsolat pontos „tekervényeit”. Az agy kiterjedt területeinek működési elveit megérthetjük úgy is, hogy a megfelelő elemzési szinten vizsgáljuk meg a dinamikájukat.

Már eddig is jelentős sikereket értünk el kiterjedt agyterületek modellezésében és szimulálásában. Lenyűgöző eredmények születtek, amikor teszteknek vetettük alá ezeket a szimulációkat, és az adatokat összehasonlítottuk a valódi emberi agyakon végzett pszichofizikai kísérletek adataival. A jelenlegi képalkotó és érzékelő eszközeink durvaságát figyelembe véve a modellalkotás sikere, ahogyan a folyamatban lévő munkák is igazolják, megfelelő bizonyíték arra, hogy képesek vagyunk helyes felismeréseket leszűrni a hatalmas mennyiségű összegyűjtött adatból.

A következőkben mindössze néhányat ismertetek az agyterületek sikeres modelljei közül – melyek kutatása jelenleg is folyik.

A neuromorf modell: a kisagy

A *The Age of Spiritual Machines* (A spirituális gépek kora) című könyvemben megvizsgáltam azt a kérdést, hogyan tud egy tízéves gyerek elkapni egy baseball-labdát.^[287] A gyerek csak a labda röppályáját látja a pályán elfoglalt helyéről. Ahhoz, hogy ténylegesen kikövetkeztesse ezt a röppályát a háromdimenziós térben, több nehéz differenciálegyenletet kellene egy időben megoldania. További egyenletekre lenne szükség a labda jövőbeli pályájának a kiszámításához, és még továbbiakra ahhoz, hogy az eredményeket átfordítsa arra, milyen mozgást kell játékosként végrehajtania a labda elkapásához. Hogy képes egy fiatal mezőnyjátékos ezt a rengeteg számítást néhány másodperc alatt, számítógép és a differenciálegyenletek ismerete nélkül elvégezni? Nyilvánvaló, hogy nem tudatosan oldja meg az egyenleteket, de hogyan oldja meg az agya a problémát?

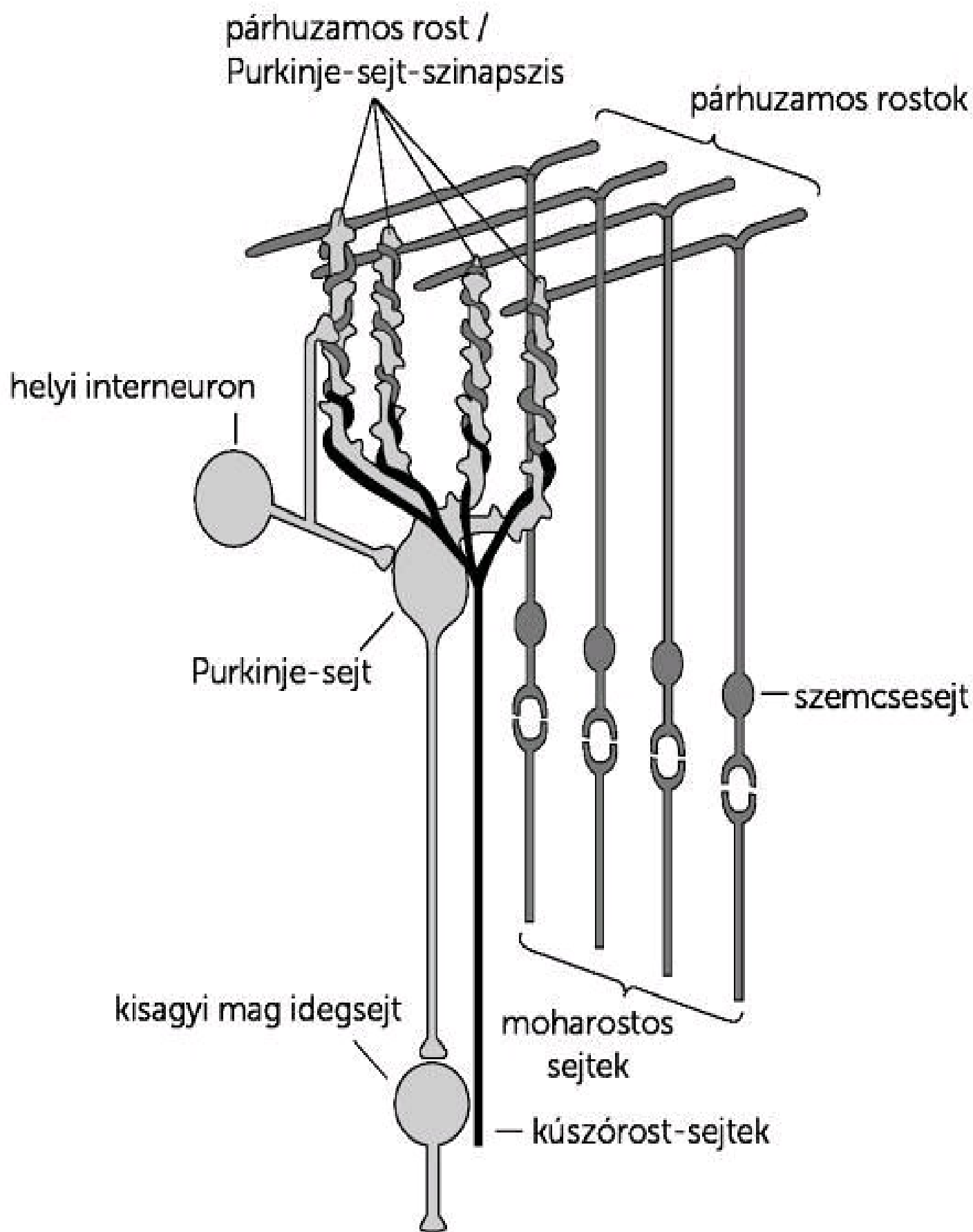
A *The Age of Spiritual Machines* megjelenése óta jelentős előrelépést tettünk a képességhasználat eme egyszerű folyamatának megértésében. Amint azt felvettem, a problémát nem a háromdimenziós mozgás mentális modelljének létrehozásával oldjuk meg, hanem leegyszerűsítjük úgy, hogy a labda megfigyelt mozgását közvetlenül átfordítjuk a játékos megfelelő mozdulatába, a karjai és lábai elhelyezkedésének változtatásaiba. Alexandre Pouget a Rochesteri Egyetemről és Lawrence H. Snyder a Washingtoni Egyetemről leírta azokat a matematikai „alapfüggvényeket”, amelyek a látótérben érzékelt mozgás közvetlenül az izmok megfelelő mozgatásába fordítják át.^[288] Ezenkívül a kisagyi működés nemrég kifejlesztett modelljeinek az elemzése bebizonyította, hogy a kisagyi neurális áramkörök valóban képesek a tanulásra, majd a szükséges alapfüggvények alkalmazására, hogy végrehajtsák ezeket a szenzoros-motoros transzformációkat. Amikor belekezdünk egy szenzoros-motoros feladatba, mint például egy labda elkapásának próba-elvetés alapú tanulási folyamatába, a kisagyi szinapszisok szinaptikus potenciáljait eddük arra, hogy megtanulják a megfelelő alapfüggvényeket. A kisagy kétféle transzformációt hajt végre ezekkel az alapfüggvényekkel: eljut egy kíváncsi eredménytől egy cselekvésig (ezt nevezik „visszafelé haladó internális modellnek”), és eljut egy lehetséges cselekvéskombinációtól egy elvárt eredményig („előrehaladó internális modell”). Tomaso Poggio rámutatott, hogy az alapfüggvények elmélete leírhatja az agy azon tanulási folyamatait

is, amelyek túlmutatnak a motoros kontrollon.^[289]

Az a szürkésfehér, baseball-labda nagyságú, bab alakú agyterület, amit kisagynak nevezünk, az agytörzsön helyezkedik el, és az agy idegsejtjeinek több mint a felét tartalmazza. Sokféle létfontosságú funkciója van, a szenzoros-motoros koordinációtól kezdve az egyensúlyozáson, a mozgás irányításán át a cselekedet eredményeinek előrejelzéséig (saját cselekedetek és más személyek vagy tárgyak vonatkozásában egyaránt).^[290] Funkcióinak és feladatainak sokfélesége ellenére szinaptikus és sejtszerveződése rendkívül konzisztens, és csak néhány fajta idegsejt található benne. Úgy tűnik, egy bizonyos fajta számítást valósít meg.^[291]

A kisagy információfeldolgozásának egysíkúsága ellenére funkciói széles körét annak a sokféle inputnak a fényében lehet megérteni, amit az agykéregtől (az agytörzs magján majd a kisagy moharostos sejtjein keresztül) és más területektől (különösen az agy „olajkamag” nevű területéből a kisagy kúszórostsejtjein keresztül) kap. A kisagy a felelős az érzékszervi bemenetek időzítésének és szekvenciájának a megértéséért, illetve a fizikai mozgásunk irányításáért.

A kisagy sokszorosán megismételt huzalozási rajza



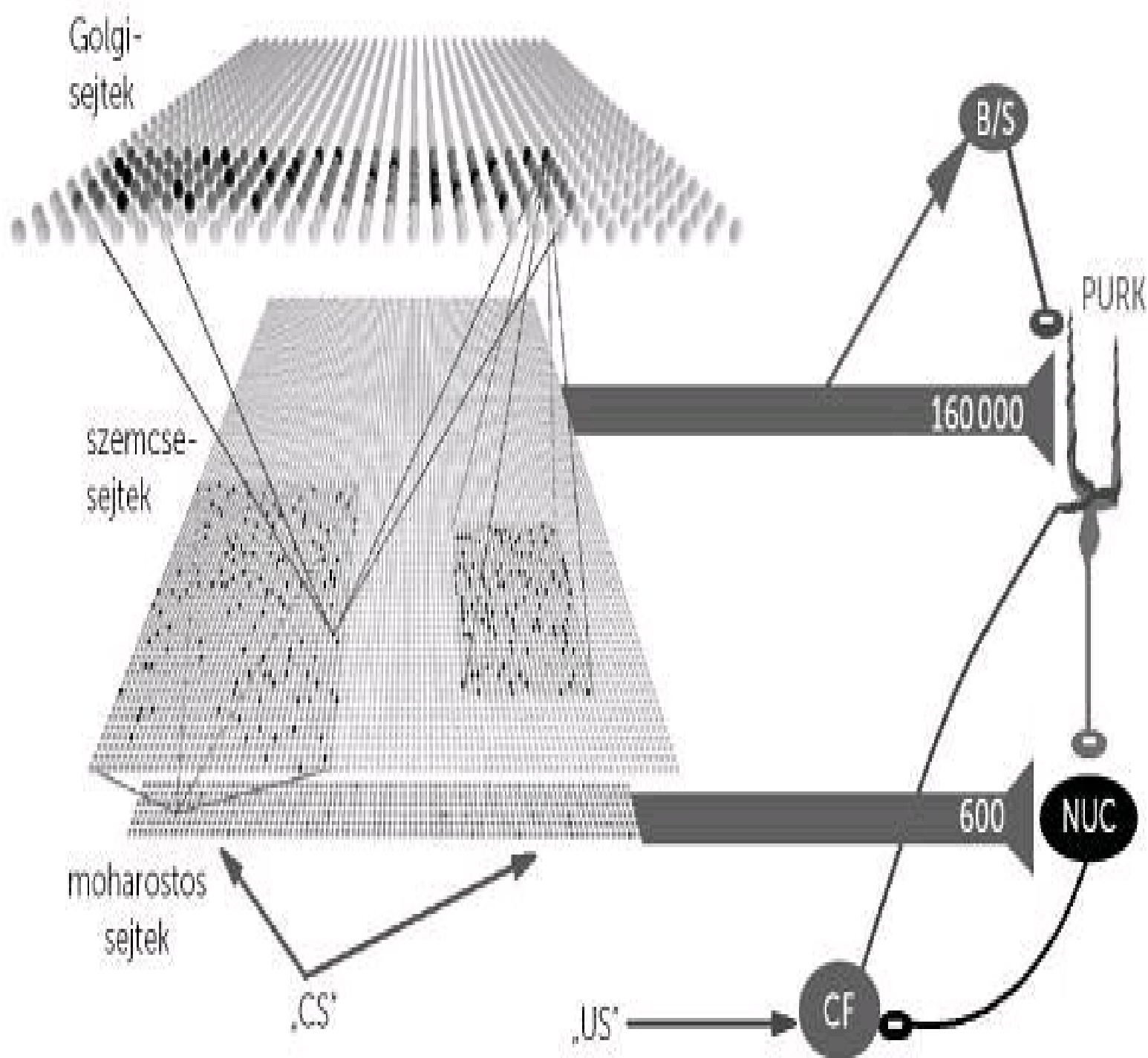
A kisagy arra is kiváló példa, hogyan haladják meg az agy képességei az azt meghatározó tömör genomét. A genom agyra vonatkozó része főképpen az egyes idegsejtfajták részletes felépítését írja le (beleértve a dendriteket, dendrittüskéket és szinapszisokat is), és azt, hogyan reagáljanak ezek a struktúrák a stimulációra és a változásra. A tulajdonképpeni „kapcsolási rajzra” viszonylag kevés genomkód vonatkozik. A kisagyban az alapvető kapcsolási rajz több milliárdszor megismétlődik. Nyilvánvaló, hogy a genom nem tartalmaz konkrét információt ennek a kisagyi struktúrának minden egyes ismétlődésére vonatkozóan, hanem arra nézve ír elő bizonyos korlátozásokat, hogy miként ismétlődjön meg ez a struktúra (ahogy a többi szerv esetében sem határozza meg minden egyes sejt pontos helyét).

A kisagy kimeneteinek egy része körülbelül kétszázezer alfa- motoros neuronhoz jut el, ezek határozzák meg a test hozzávetőleg hatszáz izmához küldött végső jeleket. Azonban az alfa-motoros neuronok bemenetei nem közvetlenül határozzák meg ezeknek az izmoknak a mozgásait, mert tömörebb, jelenleg még kevésbé ismert módon vannak kódolva. Az izmokhoz küldött végső jelzések az idegrendszer alacsonyabb szintjein kerülnek meghatározásra, nevezetesen az agytörzsben és a gerincvelőben.^[292] Érdekes módon ez az elrendezés szélsőséges formát ölt a polipban, melynek központi idegrendszere nagyon magas szintű parancsokat küld az összes karnak (például „fogd meg azt a tárgyat és húzd közelebb!”), és az egyes karok független perifériás idegrendszerére hagyja a feladat végrehajtását.^[293]

Az elmúlt években nagyon sokat megtudtunk a kisagy három alapvető idegfajtájáról. A „kúszórostoknak” nevezett idegek adják a kisagy tanítására szolgálók jeleket. A kisagy kimenetének nagy része a nagy Purkinje-sejtekből ered (amiket Johannes Purkinjéről neveztek el, mivel ő azonosította a sejtet 1837-ben), melyek mindegyike körülbelül kétszázezer inputot (szinapszist) fogad, szemben az átlagos idegsejtek körülbelül ezer inputjával. Az inputok nagyrészt a szemcsesejtekből jönnek, amelyek a legkisebb idegsejtek, körülbelül hatmillió található egy négyzetmilliméteren belőlük. A kisagynak a gyerekek kézírástanulása közben betöltött szerepére irányuló kutatás megmutatta, hogy a Purkinje-sejtek mintát vesznek a mozgássorozatból, és mindegyik más és más mintára érzékeny.^[294] Nyilvánvaló, hogy a kisagynak folyamatos perceptuális útmutatásra van szüksége a vizuális kéregtől. A kutatók össze tudták kapcsolni a kisagy sejtjeinek szerkezetét azzal a megfigyeléssel, hogy fordított arányosság áll fent a kézírás sebessége és görbülete között – azaz gyorsabban írunk, ha egyenes vonalakat rajzolunk az egyes betűk aprólékos görbéi helyett.^[295]

Az aprólékos sejtkutatásoknak és az állatkísérleteknek köszönhetően lenyűgöző matematikai leírásokkal rendelkezünk a kisagy fiziológiájára és szinapszisainak szerveződésére, valamint az inputjaiban és outputjaiban történő információkódolásra és a benne végrehajtott transzformációkra vonatkozóan.^[296] Javier F. Medina, Michael D. Mauk és munkatársaik a Texasi Orvosi Egyetemen több kutatás adatait összegyűjtve megtervezték a kisagy részletes, fordított szimulációját. Több mint tízezer szimulált idegsejtből és háromszázezer szinapsziszból áll, és megtalálható benne a kisagyi sejtek összes fő típusa.^[297] A sejtek és szinapszisok kapcsolatait egy számítógép határozza meg, amely korlátokat és szabályokat betartva „huzalozza be” a szimulált kisagyi területet, hasonlóan ahhoz a sztochasztikus (korlátok között véletlenszerű) módszerhez, amit a genetikus kód használ a valódi emberi agy felépítéséhez.^[298] Nem lenne nehéz a Texasi Egyetem szimulációját kibővíteni több szinapsziszra és sejtre.

A Texasi Egyetem kisagymodellje és -szimulációja



A texasi kutatók egy klasszikus tanulási kísérletet végeztek el a szimulációjukkal, és összehasonlították az eredményeket számos, valódi emberi kondicionálási kísérlet adataival. Az emberi kísérletekben egy hangot kellett társítani a szemhéjra fújó levegővel, amitől a szemhéj lecsukódott. Ha a hang és a fújás száz-kétszáz alkalommal együtt megtörtént, akkor az alany megtanulta a társítást, és pusztán a hang hallatán lehunyta a szemét. Ha ezután a hangot többször lejátszották a légáramlás nélkül, az alany végül megtanulta disszociálni a két ingert („kioltani” a reakciót), tehát a tanulás kétirányú. Számos paraméter finomhangolása után a szimuláció eredményei elfogadható egyezést mutattak az emberi és állati kisagyi kondicionálás eredményeivel. Érdekes módon a kutatók azt találták, hogy ha szimulált kisagyi léziókat hoznak létre (eltávolítva a szimulált kisagyi hálózat egyes részeit), akkor hasonló eredményeket kapnak, mint a valódi kisagyi léziót elszenvedett nyulakkal végzett kísérletek esetében.^[299]

Ennek a nagy agyterületnek az uniformitása és idegsejtközi felépítésének viszonylagos egyszerűsége miatt viszonylag jól értjük az input-output transzformációit, legalábbis más agyi területekhez képest. Noha a releváns egyenletek még finomításra szorulnak, ez a fordított szimuláció nagyon lenyűgözőnek bizonyult.

**Egy másik példa:
a hallásért felelős területek Watts-féle modellje**

„Véleményem szerint úgy lehet agyszerű intelligenciát létrehozni, hogy építünk egy valós idejű modellrendszert, amely kellő részletességig pontos, és kifejezi minden egyes elvégzett számítás lényegét, majd a valódi rendszeren végzett mérésekkel ellenőrizzük, hogy helyesen működik-e. A modellnek valós időben kell futnia, hogy kénytelenek legyünk megbirkózni a kényelmetlen és bonyolult valós világbeli inputokkal, amiket egyébként nem jutna eszünkbe a rendszerbe táplálni. A modellnek kellő felbontással kell működnie ahhoz, hogy összehasonlítható legyen a valódi rendszerrel, annak érdekében, hogy helyes megérzéseink legyenek arról, hogy milyen információkat jelenít meg az egyes fázisokban. Mead^[300] nyomán a modell fejlesztése szükségképpen a rendszer határaival (azaz az érzékelőkkel) kezdődik, ahol a valódi rendszert már jól értjük, és csak ezután haladhatunk tovább a kevésbé ismert területekre... Így a modell nemcsak a meglévő ismereteinket tükrözi, hanem lényegesen hozzá tud járulni a rendszer egyre jobb megértéséhez. Ilyen nagyfokú komplexitás mellett lehetséges, hogy a valódi rendszer megértésének egyetlen gyakorlatias módja az, hogy az érzékelőktől indulva és befelé haladva építjük meg a működő modelljét – arra az újonnan szerzett képességünkre támaszkodva, hogy a mind mélyebbre hatolás közben jelenítjük meg a rendszer összetettségét. Ezt a megközelítést nevezhetjük az agy visszafejtésének... Érdemes megjegyezni, hogy nem azt javasolom, hogy vakon másoljunk le olyan struktúrákat, amelyeknek a célját nem értjük, mint a legendás Ikarosz, aki naivan tollakból és viaszból próbált meg szárnyakat építeni! Nem, én azt javasolom, hogy tartsuk tiszteltben az alacsony szinten már megértett összetettséget és gazdagságot, mielőtt továbblépnénk a magasabb szintekre.”

(Lloyd Watts^[301])

Egy agyterület neuromorf modelljére kiemelkedő példa az emberi hallórendszer egy jelentős részének átfogó lemásolása, amit Lloyd Watts és munkatársai valósítottak meg.^[302] A projekt

specifikus neurontípusok neurobiológiai kutatásaira és az idegsejtek közötti kapcsolatokra vonatkozó információkra építkezett. A modell, amely az emberi hallás sok jellemzőjével bír, és képes lokalizálni, illetve azonosítani a hangokat, öt párhuzamos úton dolgozza fel a hanginformációt, és az idegrendszeri feldolgozás minden fázisában képes közvetlenül megjeleníteni ennek az információnak a leképeződését. Watts valós idejű szoftverként valósította meg a modelljét, ami, bár a munka még folyamatban van, azt bizonyítja, hogy a neurobiológiai modellek és az agy kapcsolatainak adatai működő szimulációkká alakíthatók át. A program nem az egyes neuronok és kapcsolatok reprodukálásán alapul, mint a fentebb bemutatott kisagymodell, hanem az egyes területek által végzett transzformációkon.

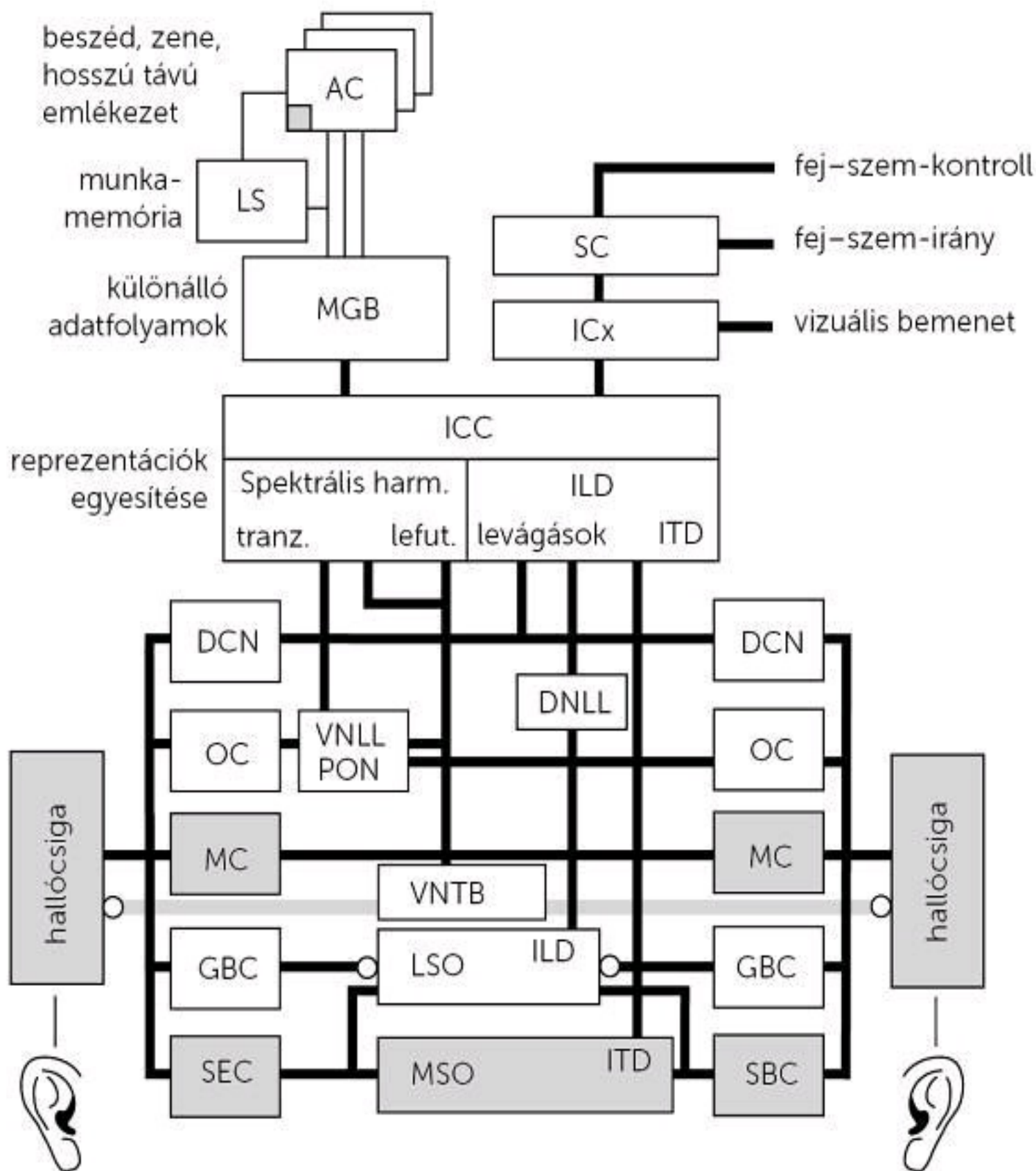
Watts szoftvere képes azokra a finom megkülönböztetésekre, amelyeket az emberi hallással és hangdiszkriminációval kapcsolatos kísérletek feltártak. Watts beszédfelismerő rendszerek előfeldolgozójának (frontendjének) használta a modelljét, bebizonyította, hogy képes kiszűrni egy beszélőt a háttérzajok közül (a „koktélparti effektus”). Ez a lenyűgöző teljesítmény az emberek számára adottság, de mindeddig nem sikerült megvalósítani automatizált beszédfelismerő rendszerekben.^[303]

Az emberi halláshoz hasonlóan Watts cochlea(csiga)-modellje is rendelkezik spektrális érzékenységgel (bizonyos frekvenciákon jobban hallunk), temporális reakcióval (érzékenyek vagyunk a hangok időzítésére, és ez hozza létre a térbeli elhelyezkedés érzetét), maszkolással, nemlineáris frekvenciafüggő amplitúdó-kompresszióval (ez teszi lehetővé a nagyon nagy dinamikatartományt – a képességet, hogy a hangos és halk hangokat is halljuk), hangerőszabályzással (erősítés) és egyéb kifinomult jellemzőkkel. A megvalósított eredmények közvetlenül ellenőrizhetők biológiai és pszichofizikai adatokkal.

A modell következő része a cochleáris magvak területe, amit Gordon M. Shepherd,^[304] a Yale Egyetem idegtudomány és neurobiológia professzora „az agy egyik legjobban megértett területének”^[305] nevezett. Watts szimulációja E. Young kutatásain alapul, aki részletesen leírja a lényegi sejtípusokat, amelyek felelősek „az energiaspektrum és a széles sávú tranziensek érzékeléséért, a spektrális csatornák finomhangolásáért, a jelek időbeli lefutására való fokozott érzékenyséért az egyes csatornában, a frekvencialevágásért és -kivágásért, miközben szabályozzák a jelerősítést az optimális érzékenység elérése érdekében a neurális impulzuskód által korlátozott dinamikatartományban”.^[306]

Watts modellje sok egyéb részletet is megvalósít, például az interaurális időeltérést (ITD), amit a középső-felső olajkamag sejtjei számítanak ki.^[307] Emellett megjeleníti az interaurális szintkülönbséget (ILD), amit az oldalsó-felső olajkamag sejtjei számítanak ki, illetve az alsó ikertestsejtek normalizálnak és szabályoznak.^[308]

Az emberi agy visszafejtése: öt párhuzamos hallópálya⁹⁶



A látórendszer

A vizuális információk kódolásának megértésében már most olyan előrehaladást értünk el, hogy kísérleti retinaimplantátumok készültek és kerültek sebészeti úton beültetésre páciensekbe.^[310] Mindazonáltal a látórendszer viszonylagos bonyolultsága miatt a vizuális információk feldolgozásáról kevesebbet tudunk, mint a hallórendszerről. Két vizuális kéregterület (a V1 és az MT) által végzett transzformációkról készültek előzetes modellek, bár nem az egyes idegsejtek szintjén. Ezeken felül harminchat egyéb vizuális területet ismerünk, és nagyon nagy felbontással kell feltérképeznünk ezeket a mélyebb régiókat, vagy nagyon pontos érzékelőket kell elhelyeznünk bennünk ahhoz, hogy megismerjük a működésüket.

A vizuális információfeldolgozás megismerésének egyik úttörője Tomaso Poggio, az MIT kutatója, aki az azonosításban és a kategorizálásban határozta meg a látás két alapvető feladatát.^[311] Poggio szerint az előbbi viszonylag egyszerű megérteni, és már terveztek kísérleti és kereskedelmi rendszereket, amelyek elfogadható sikerrel azonosítják az arcokat.^[312] Ezeket használják például a biztonsági beléptetőrendszerekben és a bankautomatákban. A kategorizálás – az a képesség, hogy különbséget tegyünk például egy ember és egy autó, vagy egy kutya és egy macska között – sokkal bonyolultabb feladat, bár a közelmúltban ezen a téren is történtek előrelépések.^[313]

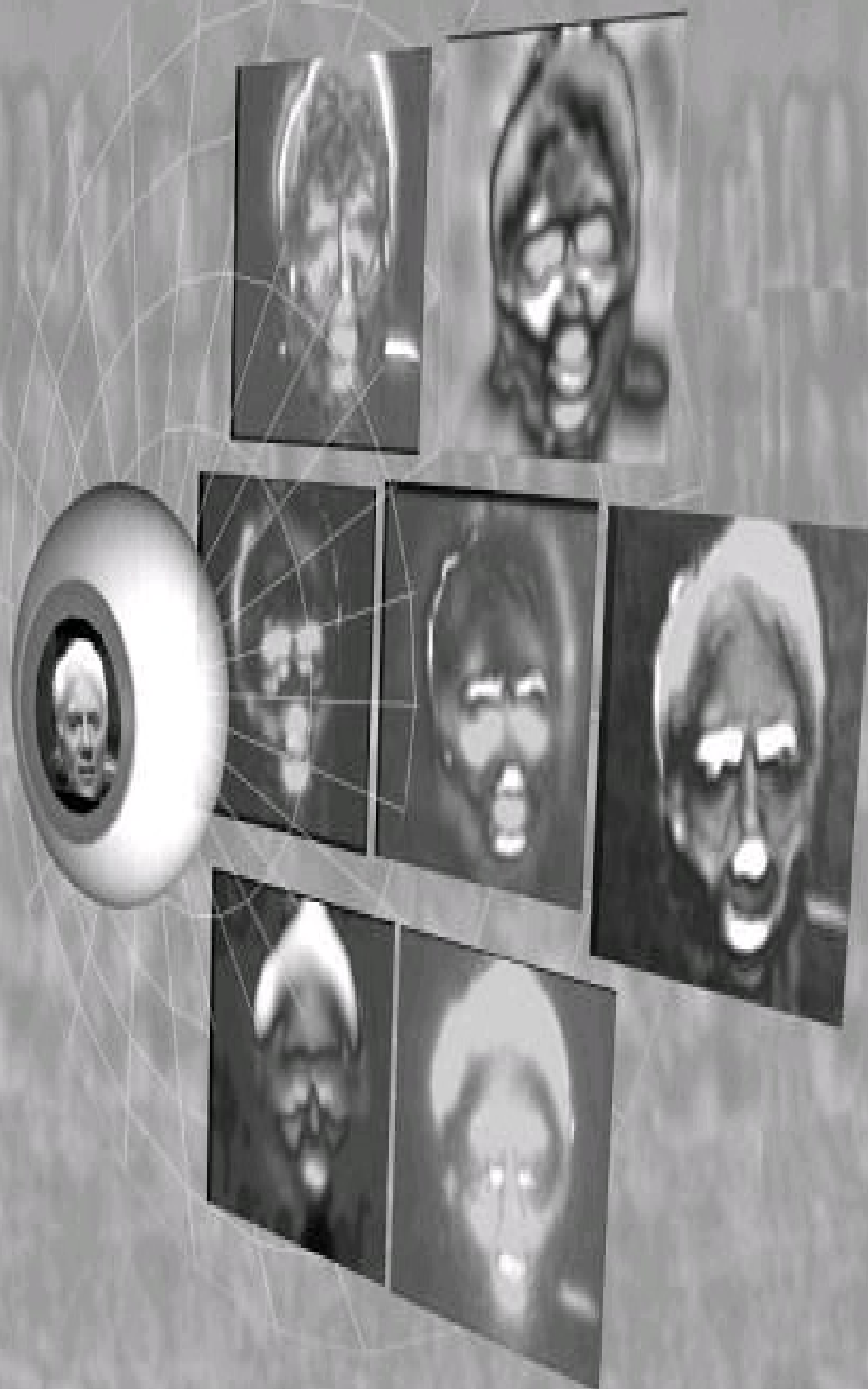
A látórendszer (evolúciós szempontból) korai rétegei nagyrészt egy előrecsatolós (visszacsatolás nélküli) rendszert alkotnak, amelyben egyre kifinomultabb vonásokat fedezünk fel. Poggio és Maximilian Riesenhuber írja, hogy „a makákók hátsó inferotemporális kérgének egyes idegsejtjeit rá lehet hangolni... egy ezer összetett alakzattól álló szótárra”. Annak a bizonyítékai között, hogy a vizuális felismerés előrecsatolós rendszert használ a felismerés során, olyan MEG-kutatások szerepelnek, amelyek kimutatták, hogy az emberi látórendszer körülbelül 150 milliszekundum alatt érzékel egy tárgyat. Ez megfelel az inferotemporális kéreg alakérzékelő sejtjei késleltetésének, tehát úgy tűnik, nincs idő arra, hogy a visszacsatolás szerepet játsszon ezekben a korai döntésekben.

A legújabb kísérletek hierarchikus megközelítést alkalmaznak, mely során az érzékelt alakzatokat a rendszer későbbi rétegei elemzik.^[314] A makákókon végzett kísérletek alapján úgy tűnik, az inferotemporális kéreg idegsejtjei reagálnak azoknak a tárgyaknak az összetett alakjára, amelyekkel az állatokat idomították. Noha az idegsejtek többsége csak a tárgy egy adott nézetére reagál, néhány a perspektívától függetlenül is képes erre. Egyéb, a makákók látórendszerét vizsgáló kutatások sok specifikus sejtípust és kapcsolódási mintázatot tanulmányoztak, és magas szintű leírásokat készítettek az információ áramlásáról.^[315]

Kiterjedt irodalom támasztja alá annak az elvnek a használatát a bonyolultabb mintázatfelismerő feladatoknál, amit én „hipotézis és próbának” nevezek. A kéreg „megtippeli”, mit lát, majd meghatározza, hogy a látómezőben lévő alakzatok megfelelnek-e a hipotézisének.^[316] Gyakran jobban koncentrálunk a hipotézisre, mint a tulajdonképpeni próbára, ami megmagyarázza, hogy az emberek miért látják és hallják néha azt, amire számítanak, nem pedig azt, ami valójában előttük van. A „hipotézis és próba” a számítógépes mintázatfelismerő rendszerekben is hasznos stratégia.

Noha az az illúziónk, hogy a szemünkből nagy felbontású képeket kapunk, a látóideg valójában csak körvonalakat és a látóterünkben lévő, érdeklődésre számot tartó pontokra való utalásokat küld az agynak. Ezután gyakorlatilag hallucináljuk a világot olyan agykérgi emlékekből, melyek egy sor rendkívül alacsony felbontású, párhuzamos csatornán érkező „mozgóképet” értelmeznek. Frank S.

Werblin, a Kaliforniai Egyetem molekuláris és sejtbiológia professzora és Boton Roska doktorandusz egy, a *Nature*-ben publikált 2001-es tanulmányban kimutatta, hogy a látóidegben tíz-tizenkét kimeneti csatorna van, melyek mindegyike csak minimális információt szállít egy adott látványról.^{[\[317\]](#)} A ganglionsejteknek nevezett csoport csak az élekről (kontrasztváltásokról) küld információt. Egy másik csak nagy, azonos színű területeket érzékel, a harmadik pedig csak az érdeklődésre számot tartó alakok mögötti háttérre érzékeny.



Hét a tucatnyi különálló „mozgóképek” közül, amelyekre a szem a látványt bontja, és amelyeket elküld az agyba

„Noha azt hisszük, hogy a maga teljességében látjuk a világot, igazából csak utalásokat, tér- és időbeli körvonalakat érzékelünk – írja Werblin. – Ez a tizenkét kép a világról alkotja az összes információt, ami valaha is rendelkezésünkre fog állni arról, hogy mi van odakint, és ebből a mindössze tizenkét képből rekonstruáljuk a vizuális világ gazdagságát. Kíváncsi vagyok, hogyan választotta ki a természet ezt a tizenkét egyszerű „mozgóképet”, és hogyan lehetséges, hogy elegendőek ahhoz, hogy ellássanak minket azokkal az információkkal, amikre láthatólag szükségünk van.” Az ilyen eredmények nagy előrelépéssel kecsegtetnek azoknak a mesterséges rendszereknek a kifejlesztése terén, melyek pótolhatják a szemet, a retinát és a látóideg alapszintű feldolgozását.

A 3. fejezetben említettem a robotika úttörőjének, Hans Moravecnek a munkásságát, aki visszafejtette a retinának és az agy alapszintű vizuális feldolgozó területeinek a képfeldolgozását. Moravec több mint harminc éven át alkotott rendszereket látórendszerünk azon képességének az emulálására, ahogy az leképezi a világot. A mikroprocesszorok számítási teljesítménye csak a közelmúltban érte el azt a szintet, hogy képes legyen lemásolni az emberi szintű alakérzékelést, és Moravec egy új robotnemzedéknél alkalmazza a számítógépes szimulációt, amely képes előre el nem tervezett módon, bonyolult környezetben, emberi szintű látással navigálni.^[318]

Carver Mead úttörő munkát végzett olyan különleges neurális chipek kifejlesztésében, melyek natív analóg üzemmódban használják a tranzisztorokat, ami által nagyon hatékonyan emulálható a neurális jelfeldolgozás analóg természete. Mead bemutatott egy chipet, amely ezt a megközelítést alkalmazva valósítja meg a retina funkcióit és a látóideg alapszintű transzformációit.^[319]

A vizuális felismerés egyik speciális típusa a mozgásérzékelés, ami a tübingeni Max Planck Biológiai Intézet egyik központi kutatási területe. Az alapvető kutatási modell egyszerű: hasonlítsuk össze az egyik receptor jelét egy szomszédos receptor időben későbbi jelével.^[320] Bizonyos sebességek mellett működik ez a modell, de ahhoz a meglepő eredményhez vezet, hogy e sebesség fölött a megfigyelt tárgy gyorsulása lassítani fogja ennek a mozgásérzékelőnek a reakcióját. Az állatokon (viselkedésükön és az idegrendszeri kimeneteik elemzésén alapuló) és embereken (az észleltekről adott beszámolókon alapuló) végzett kísérletek eredményei igazolták a modellt.

**Egyéb folyamatban lévő munkák:
mesterséges hippocampusz és mesterséges olivocerebelláris pálya**

A hippocampusz létfontosságú az új információk megtanulásához és az emlékek hosszú távú tárolásához. Ted Berger és munkatársai a Dél-Kaliforniai Egyetemen feltérképezték ennek az agyi területnek a jelminiatúráit: patkányok hippocampuszának a szeleteit stimulálták elektromos jelekkel, több milliószor, hogy meghatározzák, melyik input hozta létre az annak megfelelő outputot.^[321] Ezután megalkottak egy valós idejű matematikai modellt a hippocampusz rétegei által végrehajtott transzformációkról, és beprogramozták a modellt egy chipbe.^[322] A terv az, hogy állatokban próbálják ki a chipet, előbb kiiktatva a megfelelő hippocampusz-területet, feljegyezve az ennek nyomán létrejövő emlékezési nehézségeket, majd meghatározva, hogy helyre lehet-e állítani a mentális funkciót azzal, hogy a kiiktatott terület helyére beültetik a hippocampusz-chipet.

Ez a megközelítés talán alkalmazható lesz az agyvérzéstől, epilepsziától vagy Alzheimer-kórtól szenvedő betegek hippocampuszának a pótlására. A chipet nem az agyban helyeznék el, hanem a páciensek koponyáján, és a sérült hippocampusz-terület két oldalára kapcsolt két elektródakötegen

keresztül kommunikálna az aggyal. Az egyik az agy többi részéből érkező elektromos tevékenységet érzékelné, a másik pedig a megfelelő utasításokat küldené vissza az agynak.

Egy másik agyterület, amelyről modell és szimuláció készül, az egyensúlyozásért és a végtagok mozgásáért felelős olivocerebelláris terület. A nemzetközi kutatócsoportnak az a célja, hogy katonai robotokban alkalmazzák a mesterséges olivocerebelláris áramkört, illetve olyan robotokban, amelyek képesek lennének segíteni a mozgássérülteknek.^[323] Többek között azért választották épp ezt az agyterületet, mert „minden gerinces élőlényben megtalálható – majdnem ugyanolyan a legegyszerűbb és a legbonyolultabb agyban is – magyarázza Rodolfo Llinas, az egyik kutató, a New York-i Orvosi Egyetem idegtudósa. – Feltételezésünk szerint azért konzerválódott (az evolúció során), mert egy nagyon intelligens megoldást testesít meg. Mivel a rendszer a motoros koordinációért felelős – és mi egy olyan gépet akarunk, amely kifinomult motoros irányítással rendelkezik –, kézenfekvő volt a (lemásolandó agyterület) kiválasztása”.

A szimulátoruk egyik egyedülálló vonása az, hogy analóg áramköröket használ. Meadnek az agyterületek analóg emulálása terén végzett úttörő munkájához hasonlóan a kutatók ezúttal is lényegesen nagyobb teljesítményt értek el sokkal kevesebb alkatrésszel, amikor natív analóg üzemmódjukban használták a tranzisztorokat.

A csapat egyik kutatója, Ferdinando Mussa-Ivaldi, a az Északnyugati Egyetem idegtudósa a következőket mondta a mesterséges olivocerebelláris áramkör alkalmazásáról a mozgássérültek esetében: „Gondoljunk egy megbénult betegre! El lehet képzelni, hogy sok hétköznapi feladatot – egy pohár víz kitöltését, az öltözést, a vetkőzést, a beülést a tolószékbe – robotsegítőkkel hajt végre, és így nagyobb önállóságra tesz szert.”

**A magasabb szintű funkciók megértése:
utánzás, előrejelzés és érzelmek**

„A gondolkodás műveletei olyanok, mint a lovassági rohamok a csatában – szigorúan korlátozott a számuk, pihent lovakat igényelnek, és csak a döntő pillanatokban kerülhet sor rájuk.”

(Alfred North Whitehead)

„Az emberi szintű intelligencia legnagyobb jellemzője azonban nem az, amit akkor csinál, amikor működik, hanem az, amit akkor, amikor elakad.”

(Marvin Minsky)

„Ha a szeretet a válasz, akkor át tudná fogalmazni a kérdést?”

(Lily Tomlin)

Mivel az idegrendszeri hierarchia legtetején foglal helyet, a legkevésbé ismert agyterület az agykéreg. Ez a terület, amely az agyféltekék legkülső részén helyezkedik el és hat vékony rétegből áll, több milliárd idegsejtet tartalmaz. Thomas M. Bartol Jr., a Salk Biológiai Kutatóintézet számítógépes neurobiológiai laboratóriumának a munkatársa szerint „egy köbmilliméter agykéregben akár ötmilliárd (...) különböző alakú és nagyságú szinapszis is lehet.” Az agykéreg felelős az érzékelésért, a tervezésért, a döntéshozatalért és a tudatos gondolkodásnak tartott dolgok nagy részéért.

Úgy tűnik, fajunk egyik egyedi jellemzője, a nyelvhasználat képessége is ezen az agyterületen helyezkedik el. Nagyon érdekes nyom a nyelv eredetével és ennek a megkülönböztető képességnek a

létrejöttét lehetővé tévő kulcsfontosságú evolúciós változással kapcsolatban az a megfigyelés, hogy csak néhány főemlős, köztük az ember és a majom, képes (valódi) tükröt használni ismeretek elsajátításához. Giacomo Rizzolatti és Michael Arbib azt az elméletet állították fel, hogy a nyelv a kézmozdulatokból alakult ki (amikre a majmok – és természetesen az emberek – képesek). Egy kézmozdulat végrehajtásához képesnek kell lenni mentálisan összehangolni a mozdulatot és a saját kéz mozgásának a megfigyelését.^[324] A „tükrrendszer-hipotézisük” lényege az, hogy a nyelv evolúciójának a kulcsa a „paritás” nevű jellemző, ami annak a megértése, hogy a kézmozdulat (vagy a megszólalás) ugyanazt a jelentést hordozza a gesztikuláló fél számára, mint a címzett számára; azaz annak a megértése, hogy amit a tükrben látunk, az ugyanaz (bár fordítottan), mint amit mások látnak, amikor ránk néznek. Más állatok nem képesek így felfogni a tükrben látott képet, és emiatt hiányzik a paritás alkalmazására való képességük.

Szorosan idetartozik az a gondolat, hogy a mások mozdulatainak (illetve az emberi csecsemők esetében a mások hangjának) az utánzására való képesség kulcsfontosságú a nyelv elsajátításában.^[325] Az utánzáshoz elengedhetetlen az a képesség, hogy részekre bontsuk a megfigyelt jelenséget, majd a részeket rekurzív és iteratív finomítás során megértjük.

A nyelvi kompetencia egy új elmélete a rekurziót tartja a kulcsfontosságú képességnek. Noam Chomsky a nyelvről alkotott első elméleteiben sok közös tulajdonságot sorolt fel, amelyek magyarázatul szolgálnak az emberi nyelvek hasonlóságaira. Marc Hauser, Noam Chomsky és Tecumseh Fitch egy 2002-es írásban a „rekurzió” tulajdonságát nevezi meg az emberi faj egyedülálló nyelvi képességének magyarázataként.^[326] A rekurzió az a képesség, hogy kis részekből nagyobb darabokat alkossunk, majd a nagyobb darabot egy másik struktúra részeként használjuk, és iteratív módon folytassuk ezt a folyamatot. Így tudjuk felépíteni a mondatok és bekezdések bonyolult szerkezetét a korlátozott szókészletből.

Az emberi agy egy másik kulcsfontosságú jellemzője az előrejelzések alkotására való képesség, beleértve a saját döntései és cselekedetei eredményeinek előrejelzését is. Egyes tudósok szerint az előrejelzés az agykéreg elsődleges funkciója, bár a kisagy szintén fontos szerepet játszik a mozgás előrejelzésében.

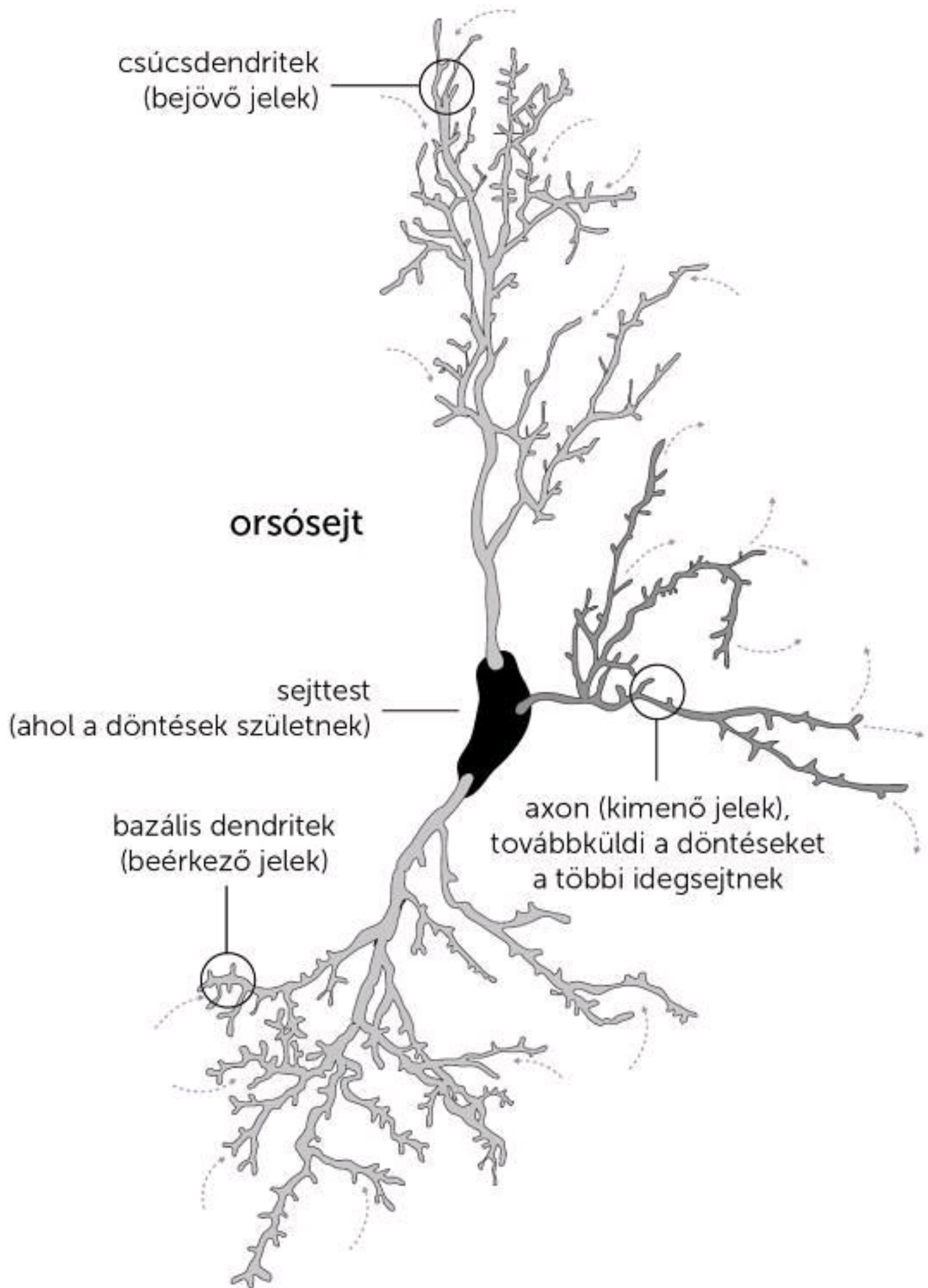
Érdekes módon képesek vagyunk előre jelezni vagy előre megérezni a döntéseinket. Benjamin Libetnek, a Kaliforniai Egyetem fiziológiaprofesszorának a kutatásai azt mutatják, hogy egy cselekvés kezdeményezésére irányuló idegrendszeri aktivitás körülbelül egyharmad másodperccel azelőtt következik be, mielőtt az agy meghozná a döntést, hogy végrehajtja a cselekvést. Libet szerint ebből az következik, hogy a döntés valójában illúzió, „tudatnak nincs szerepe a folyamatban”. Daniel Dennett kognitív tudós és filozófus a következőképpen írja le a jelenséget: „A cselekvés először kiváltódik az agy valamelyik részében, majd elindulnak a jelzések az izmokhoz, útközben megállva, hogy közöljék velünk, a tudatos cselekvőkkel, hogy mi történik (és közben jó hivatalnokokra jellemző módon meghagynak minket, a csetlő-botló elnököket, abban az illúzióban, hogy mi indítottuk el az egészet).”^[327]

A közelmúltban elvégeztek ezzel kapcsolatban egy kísérletet, amelyben a neurofiziológusok elektromosan ingerelték az agy bizonyos pontjait, hogy bizonyos érzelmeket kiváltsanak. A vizsgált személyek azonnal kitaláltak valamilyen magyarázatot arra, hogy miért érzik a felmerülő érzelmeket. Régóta tudjuk, hogy azoknál, akiknél a bal és jobb agyfélteke között megszűnik a kapcsolat, az egyik fele (általában a verbálisabb bal agyfélteke) bonyolult magyarázatokat („konfabulációkat”) gyárt a másik oldal által kezdeményezett cselekvésekre, mintha a bal agyfélteke lenne a jobb agyfélteke sajtószóvivője.

Az emberi agy legbonyolultabb képessége – amit én a csúcstechnikájának tartanék – az érzelmi intelligencia. Agyunk összetett és sokszorosán összekapcsolódott hierarchiájának a tetején ott feszeng a képességünk arra, hogy több más magas szintű funkció között érzékeljük az érzelmeket, és adekvát reakciókat adjunk rájuk, hogy részt vegyünk a társas helyzetekben, hogy legyen erkölcsi érzékünk, hogy megértsük a vicceket, és hogy érzelmi reakciókat adjunk a zenére és a képzőművészeti alkotásokra. Nyilvánvaló, hogy az érzékelés és az elemzés alacsonyabb szintű funkciói hozzájárulnak az agyunk érzelmi működéséhez, de már kezdjük megismerni a szóban forgó agyterületeket, sőt elkezdtük modellezni azokat az idegsejtfajtákat, amelyek az ilyen ügyekkel foglalkoznak.

A legújabb megismerések azoknak a próbálkozásainknak az eredményei, hogy megértsük, miben különbözik az ember agya a többi emlősétől. A válasz az, hogy a különbségek minimálisak, de kulcsfontosságúak, és segítenek felismerni, hogyan dolgozza fel az agy az érzelmeket és az érzéseket. Az egyik különbség az, hogy az embereknek nagy agykérge van, ami a tervezésre, döntéshozatalra és az analitikus gondolkodás egyéb formáira való erősebb képességünket tükrözi. Egy másik kulcsfontosságú megkülönböztető vonás az, hogy az érzelmi töltéssel rendelkező szituációkat különleges, orsósejtnek vagy Von Economo-neuronoknak nevezett idegsejtek kezelik, amelyek csak az emberekben és néhány nagy majomban találhatók meg. Ezek az idegsejtek nagyok, hosszú nyúlványjaikat csúcsdendriteknek nevezik, és számos kapcsolatot hoznak létre sok más agyterülettel. Ez a fajta „mély” összekapcsoltság, amiben egyes idegsejtek több terület között biztosítanak kapcsolatot, egyre nagyobb mértékben fordul elő, ahogy felfelé haladunk az evolúciós létrán. Érzelmi reakcióink bonyolultságát tekintve nem meglepő, hogy az érzelmek kezelésében és az erkölcsi ítéletekben részt vállaló orsósejtek ennyire sok kapcsolatot hoznak létre.

Az viszont megdöbbentő, hogy milyen kevés orsósejt létezik ezen a területen: mindössze 80 000 található az emberi agyban (körülbelül 45 000 a jobb agyféltekében és 35 000 a bal agyféltekében). Úgy tűnik, ez a szerény, de kimutatható egyenlőtlen megoszlás magyarázza azt a megfigyelést, hogy az érzelmi intelligencia a jobb agyféltekéhez tartozik. A gorilláknak 1600 ilyen sejtjük van, a bonobóknak körülbelül 2100, a csimpánzoknak pedig körülbelül 1800. Más emlősökben egyáltalán nem található meg.^[8]



Dr. Arthur Craig, a phoenixi Barrow Idegtudományi Intézet munkatársa a közelmúltban elkészítette az orsósejtek leírását.^[328] A testből, a bőr, az izmok, a szervek és egyéb területek idegeiből érkező inputok (a becslések szerint több száz megabit per másodperc sebességgel) beáramlanak a felső gerincvelőbe. Ezek üzeneteket visznek az érintésről, a hőmérsékletről, a savszintekről (például az izmok tejsavszintjéről), a táplálék mozgásáról az emésztőrendszerben, és még sok másféle információt. Az adatokat az agytörzs és a középgy dolgozza fel. A Lamina I. nevű gerincvelői területhez tartozó idegsejtek elkészítenek egy, a test aktuális állapotát tükröző térképet, hasonlót ahhoz, amelyet a légiforgalmi irányítók használnak a repülőgépek nyomon követésére.

Az információ ezután áthalad egy mogyoró nagyságú területen, a hátsó ventromediális magon (VMN), amely a testi állapotokra – például „ez borzalmas ízű”, „micsoda bűz”, vagy „ez a könnyed érintés izgató” – adott bonyolult reakciókat számítja ki. Az egyre kifinomultabb információ végül az agykéreg két inzulának, „szigetnek” nevezett részébe jut. Ezek a kisujj nagyságú struktúrák az agykéreg bal és jobb oldalán helyezkednek el. Craig szerint a VMN és a két inzula „egy rendszer, ami az anyagi ént képviseli”.

Noha a mechanizmusokat még nem ismerjük, ezek a területek létfontosságúak az öntudat és a bonyolult érzelmek szempontjából. Más állatokban sokkal kisebbek. A makákók VMN-je például körülbelül homokszem nagyságú, az alacsonyabb szintű állatoké pedig még kisebb. Ezek a megállapítások egybecsengenek azzal az egyre kiterjedtebb konszenzussal, hogy az érzelmeink szoros kapcsolatban állnak azokkal az agyterületekkel, melyek a test térképeit tartalmazzák. Ezt a nézetet különösen dr. Antonio Damasio, az Iowai Egyetem kutatója támogatja.^[329] Azzal a nézettel is egybecsengenek, hogy a gondolkodásunk jelentős része irányul a testünk felé: a megóvására és javítására, a miriádnyi szükséglete és vágya kielégítésére.

A közelmúltban felfedezték a testből érzékszervi információként induló jelek feldolgozásának egy következő szintjét is. A két inzula adatai a jobb oldali sziget elején lévő kis területre, a frontoinzuláris kéregbe kerülnek. Ez az a terület, ahol az orsósejtek találhatóak, és fMRI-vizsgálatok kimutatták, hogy különösen aktív, amikor valaki magas szintű érzelmeket, például szerelmet, haragot, szomorúságot és szexuális vágyat él át. Az orsósejteket erősen aktiváló szituációk közé tartozik az is, amikor valaki ránéz a szerelmére, vagy meghallja a gyermeke sírását.

Az antropológusok szerint az orsósejtek tíz-tizenötmillió évvel ezelőtt jelentek meg a majmok és a hominidák (az emberfélék családja) még felfedezésre váró közös ősnél, és körülbelül százezer évvel ezelőtt ugrásszerűen megnőtt a számuk. Érdekes módon az újszülötteknek nincsenek orsósejtjeik, csak négy hónapos kor körül kezdenek el kialakulni, és egy-hároméves kor között nő meg jelentősen a számuk. Ugyanebben az életszakaszban alakul ki a gyerekek erkölcsi érzéke és a magas szintű érzelmek – például a szeretet – átélésére való képessége.

Az orsósejtek abból nyerik erejüket, hogy hosszú csúcsdendritjeik sokszorosán össze vannak kapcsolódva sok egyéb agyterülettel. A magas szintű érzelmekre, amelyeket az orsósejtek feldolgoznak, ennél fogva hatással van az összes perceptuális és kognitív agyterületünk. Ennél fogva nehéz lesz az orsósejtek pontos működését visszafejteni, amíg nincsenek jobb modelljeink azokról a területekről, amelyekkel kapcsolatban állnak. Mindazonáltal figyelemre méltó, milyen kevés idegsejt hozható közvetlen összefüggésbe ezekkel az érzelmekkel. Ötvenmilliárd idegsejt található a kisagyban, amelyek a készségekkel kapcsolatos információkkal foglalkoznak, több milliárd az agykéregben, amelyek a percepció transzformációit és a racionális tervezést végzik el, de mindössze körülbelül nyolcvanezer orsósejt foglalkozik a magas szintű érzelmekkel. Fontos rámutatni, hogy az orsósejtek nem végeznek racionális problémamegoldást, és ezért nincs racionális kontrollunk a zenére adott reakcióink vagy a szerelem fölött. Az agy többi része viszont keményen igyekszik értelmet

találni rejtélyes magas szintű érzelmeinkben.

Az agy és a gépek összekapcsolása

„Kezdeni akarok valamit az életemmel; kiborg akarok lenni.”

(Kevin Warwick)

Az emberi agy működésének a megértése segíteni fog hasonló, a biológia által ihletett gépeket építenünk. Az így szerzett tudás egy másik fontos alkalmazási területe az agyunk és a számítógépek összekapcsolása lesz, amihez szerintem egyre közelebb kerülünk az elkövetkező évtizedekben.

A DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, azaz a „Fejlett Védelmi Kutatási Projektek Ügynöksége”) már ma évente 24 millió dollárt költ az agy és a számítógépek közötti közvetlen csatolófelületek kutatására. Mint fentebb írtam (lásd *A látórendszer* című részt), Tomaso Poggio és James DiCarlo az MIT-n, Christof Koch pedig a Kaliforniai Műszaki Egyetemen (Caltech) kísérletezik a vizuális objektumok felismerésének és az így kapott információ kódolásának a modellezésével. Az eredményeik révén végül talán képesek leszünk közvetlenül az agyba sugározni képeket.

Miguel Nicolelis és munkatársai a Duke Egyetemen érzékelőket ültettek be majmok agyába, lehetővé téve, hogy az állatok pusztán a gondolataikkal irányítsanak egy robotot. A kísérlet első lépéseként megtanították a majmokat arra, hogy kurzort mozgassanak a képernyőn egy botkormánnyal. A tudósok összegyűjtötték az EEG-jeleket, és később úgy állították be a rendszert, hogy a kurzor ne a botkormány elmozdítására, hanem a megfelelő EEG-mintázatra reagáljon. A majmok hamar rájöttek, hogy a botkormány már nem működik, és a gondolataikkal tudják irányítani a kurzort. Ezt a „gondolatérzékelő” rendszert ezután rákötötték egy robotra, és a majmok meg tudták tanulni, hogyan vezéreljék a robot mozgását pusztán a gondolataikkal. Mivel vizuális visszajelzést kaptak a robot viselkedéséről, tökéletesíthették a gondolatvezérlésüket. Ennek a kutatásnak az a célja, hogy hasonló rendszereket hozzanak létre mozgássérült emberek számára, akik így irányítani tudják majd a végtagjaikat és befolyásolhatják a környezetüket.

Az idegrendszeri implantátumok és a biológiai idegsejtek összekapcsolásának legnagyobb nehézsége abban rejlik, hogy az idegsejtek gliasejteket termelnek, amelyek az agyat védve körülveszik az „idegen” tárgyakat. Ted Berger és munkatársai különleges, biológiaiinak tűnő bevonatokon dolgoznak, amelyeket nem taszítani, hanem vonzani fognak a közelükben lévő idegsejtek.

Az emberi megismerés és az agytudományok kutatásának céljára létrehozott müncheni Max Planck Intézetben közvetlen kapcsolatot próbál létrehozni az idegek és elektronikus eszközök között. Egy, az Infineon által gyártott chip lehetővé teszi, hogy idegsejtek növekedjenek egy speciális táptalajban, amely közvetlen kapcsolatot biztosít az idegek és az elektronikus érzékelők illetve stimulátorok között. A Caltech hasonló kutatásai a „neurochip” terén azt bizonyították, hogy lehetséges kétirányú, nem invazív kommunikáció az idegsejtek és az elektronikus eszközök között.^{[\[330\]](#)}

Azt már tudjuk, hogyan hozzunk létre csatolófelületet a sebészi úton beültetett idegrendszeri implantátumok számára. A cochleáris (belső fül) implantátumok esetében megállapították, hogy a hallóideg átszervezi önmagát, hogy pontosan értelmezze az implantátumtól érkező többcsatornás jelet. Úgy tűnik, hasonló folyamat játszódik le a Parkinson-kórban szenvedő betegeknél használt mélyagyi stimuláló implantátum esetében is. Az ennek az amerikai egészségügyi ellenőrző hatóság által is jóváhagyott agyi implantátumnak a közelében lévő biológiai idegsejtek jeleket fogadnak az

elektronikus eszköztől, és úgy reagálnak, mintha az egykor működőképes biológiai sejtektől kapták volna azokat. A Parkinson-kór implantátumának legújabb változatainál már lehetséges kívülről, egyenesen az implantátumba feltölteni a szoftvere legújabb változatait.

Az agy egyre gyorsuló ütemű visszafejtése

„A Homo sapiens, az első igazán szabad faj, hamarosan felmond a természetes kiválasztásnak, a minket létrehozó erőnek... Hamarosan mélyen magunkba kell néznünk, és el kell döntenünk, mivé akarunk válni.”

*(E. O. Wilson: Consilience: The Unity of Knowledge
[Egybehangzás: a tudás egysége], 1998)*

„Tudjuk, mik vagyunk, de nem tudjuk ám, mivé lehetünk.”

(William Shakespeare)

„A legfontosabb az, hogy bármelyik pillanatban készek legyünk feláldozni azt, amik vagyunk, azért, amiké válhatunk.”

(Charles Dubois)

Egyes megfigyelők azon aggodalmuknak adtak hangot, hogy miközben modelleket, szimulációkat és kiterjesztéseket készítünk az emberi agyhoz, azt kockáztatjuk, hogy nem igazán értjük meg azt, amivel babrálunk, sem annak törékeny egyensúlyait. W. French Anderson szerint:

„Talán olyanok vagyunk, mint a kisfiú, aki szereti szétszedni a dolgokat. Elég okos hozzá, hogy szétszereljen egy órát, és talán még ahhoz is, hogy úgy rakja össze, hogy ismét működjön. De mi történik, ha megpróbálja „továbbfejleszteni”?... A fiú megérti, ami látható, de nem értheti azokat az aprólékos mérnöki számításokat, amelyek meghatározzák, pontosan milyen erőseknek kell lenniük az egyes rugóknak. (...) Ha megpróbálja továbbfejleszteni az órát, valószínűleg csak el fogja rontani... attól félek... mi sem értjük igazán, mitől ketyegnek az életek, amikkel babrálunk.”^{[\[331\]](#)}

Ugyanakkor Anderson aggodalma nem tükrözi a több tízezer agykutató és számítógéptudós arra irányuló széleskörű erőfeszítéseit, hogy módszeresen felmérjék a modellek és szimulációk korlátait és képességeit, mielőtt továbblépnének velük a következő szintre. Nem anélkül próbáljuk szétszedni és másképp összerakni az agy billiónyi alkatrészét, hogy ne végeznénk részletes elemzést minden lépés előtt. Az agy működési elveinek megértése egy sor egyre kifinomultabb modellen keresztül zajlik, mely modellek mindegyike egyre pontosabb és egyre nagyobb felbontású adatokon alapul.

Ahogy az emberi agy emulálására fordítható számítási kapacitás egyre nő – a szuperszámítógépekkel már majdnem ott tartunk –, az emberi agy feltérképezésére és érzékelésére tett erőfeszítések, a működő modellek és szimulációk alkotása egyre gyorsul. Mint a könyvben szereplő összes előrevetítés esetében, fontos megérteni a terület fejlődésének exponenciális jellegét. Gyakran találkozom olyan kollégákkal, akik azzal érvelnek, hogy még legalább egy évszázadnak el kell telnie, mire teljesen megértjük az agy működését. Mint oly sok tudományos előrejelzés, ez a nézet is a jövő lineáris szemléletén alapul, és nem vesz tudomást a fejlődés inherens gyorsulásáról, sem a mögöttes

technológiák exponenciális növekedéséről. Az ilyen túlzóan konzervatív álláspontok mellett gyakran a jelenlegi eredmények mélységének alábecsülésén alapulnak, akár még az adott tudományterület művelői körében is.

A képalkotó és érzékelő eszközök tér- és időbeli felbontása évente megduplázódik. A képalkotás sávszélessége, az ár–teljesítmény-arány és a képrekonstrukció sebessége szintén exponenciálisan javul. Ezek a trendek a képalkotó módszerek minden formájára igazak: a teljesen nem invazív képalkotásra, a nyitott koponyán végzett *in vivo* képalkotásra és a destruktív képalkotásra egyaránt. Az agyból és az eddig elkészült modellekből szerzett információk adatbázisának a nagysága szintén évente megduplázódik.

Bebizonyítottuk, hogy a szubcelluláris részek, az idegsejtek és a kiterjedt idegrendszeri területek modellezésére és szimulálására való képességünk szoros összefüggésben áll az ezekhez szükséges eszközök és adatok hozzáférhetőségével. Az idegsejtek és a szubcelluláris részek működése gyakran jelentős összetettséggel és számos nemlinearitással jár, ám az idegsejtcsoportok és az idegrendszeri területek működése gyakran egyszerűbb, mint az alkotórészeiké. Egyre erősebb matematikai eszközeink vannak, amelyeket egyre hatékonyabb szoftverekben alkalmazunk, s így képesek vagyunk pontosan modellezni az ilyen összetett, hierarchikus, adaptív, félig véletlenszerű, önszervező, erősen nemlineáris rendszereket. Az eddigi sikereink több fontos agyterület modellezésében bizonyítják ennek a megközelítésnek a működőképességét.

A jelenleg fejlesztés alatt álló képalkotó berendezések a történelem során először biztosítanak olyan tér- és időbeli felbontást, amivel valós időben figyelhetjük meg az egyes dendritek, tüskék és szinapszisok működését. Ezekkel az eszközökkel hamar el fog készülni a nagyobb felbontású modellek és szimulációk újabb nemzedéke.

A 2020-as években, a nanobotkorszak beköszönte után az idegrendszer működésének minden fontos jellemzőjét nagyon nagy felbontással, magán az agyon belül fogjuk tudni megfigyelni. A hajszálerekbe juttatott több milliárd nanobot nem invazív módon, valós időben fogja feltérképezni az egész élő agyat. Már most, a jelenlegi durva eszközeinkkel is képesek vagyunk működő (bár még nem teljes) modelleket készíteni kiterjedt agyterületekről. Húsz év múlva a számítási kapacitás legalább a milliószorosa lesz a jelenleginek, és a képalkotó eszközök felbontása, illetve sávszélessége is a sokszorosára fog nőni. Így tehát biztosak lehetünk benne, hogy a 2020-as évekre lesznek olyan adatgyűjtő és számítástechnikai eszközeink, amelyekkel modellezhetjük és szimulálhatjuk a teljes működő agyat, s ezáltal lehetségessé válik az emberi intelligencia működési elveinek és az egyéb MI-kutatásokból származtatott intelligens információfeldolgozó módszereknek a kombinálása. A gépek azon inherens képessége is a segítségünkre lesz, hogy hatalmas mennyiségű információt képesek tárolni, visszakeresni és gyorsan megosztani. Ekkor olyan helyzetbe kerülünk, hogy az emberi agy viszonylag rögzített architektúrájának a képességeit nagymértékben túlszárnyaló számítástechnikai platformokon alkalmazhatjuk ezeket a hibrid rendszereket.

Az emberi intelligencia skálázhatósága. Válaszul Hofstadter aggodalmára, miszerint az emberi intelligencia talán épp afelett a küszöb felett van, vagy épp alatta, ami „önmagunk” megértéséhez szükséges, az agy visszafejtésének egyre gyorsuló üteme világossá teszi, hogy nincsenek korlátai az önmagunk – vagy bármi más – megértésére való képességünknek. Az emberi intelligencia skálázhatóságának a kulcsa az a képességünk, hogy modelleket tudunk alkotni a valóságról az elménkben. Ezek a modellek lehetnek rekurzívek, azaz az egyik tartalmazhat egy vagy több másikat, amelyek szintén tartalmazhatnak egyéb modelleket, és így tovább, a végtelenségig. Például egy

biológiai sejt modellje tartalmazhatja a sejtmag, a riboszómák és egyéb sejtszintű rendszerek modelljeit. A riboszóma modellje tartalmazhatja a szubmolekuláris alkotórészei modelljeit, és így tovább, le az atomi és szubatomi részecskékig és kölcsönhatásokig.

Az összetett rendszerek megértésére való képességünk nem feltétlenül hierarchikus. Egy összetett rendszert, például egy sejtet vagy emberi agyat nem lehet egyszerűen azáltal megismerni, hogy az alrendszerre és alkotórészeire bontjuk. Egyre kifinomultabb matematikai eszközeink vannak a rendet és a káoszt egyaránt magukban foglaló rendszerek – mindkettőből akad bőségesen a sejtben és az agyban is –, és a logikai elemzéssel dacoló összetett kölcsönhatások megértésére.

A számítógépeink, amelyek szintén egyre gyorsabbak, kulcsfontosságú eszközök ahhoz, hogy egyre bonyolultabb modellekkel dolgozzunk, amiket másképp, csak az agyunkra támaszkodva nem tudnánk megalkotni. Nyilvánvaló, hogy Hofstadter aggodalma jogos lenne, ha olyan modellekre lennénk korlátozva, amelyeket a technológia segítsége nélkül, az elménkben kellene őriznünk. Az, hogy az intelligenciánk éppen a saját maga megértéséhez szükséges küszöb fölött van, abból a velünk született képességünkől fakad, hogy elképzeljük, finomítsuk, kiterjesszük és megváltoztassuk saját megfigyeléseink absztrakt – és egyre pontosabb – modelljeit, és ehhez a képességhez hozzájárulnak még a saját magunk által készített eszközök is.

Az emberi agy feltöltése

„A számítógépünk képzeletének kitalációjává válni.”

*(David Victor de Transend: Godling's Glossary
[Godling szótára – a feltöltés definíciója])*

Az agynak a megértés érdekében történő feltérképezésénél, sokkal vitatottabb az az elképzelés, hogy *azért térképezzük fel, hogy feltöltsük*. Egy emberi agy feltöltése azt jelenti, hogy a legapróbb részletekig feltérképezzük, majd elhelyezzük az eredményeket egy kellően nagy teljesítményű számítási közegben. Ez a folyamat rögzítené egy személy teljes személyiségét, emlékezetét, ismereteit és élettörténetét.

Ha valóban rögzítjük egy adott személy mentális folyamatait, akkor a másolatnak szüksége lenne egy testre, hiszen gondolkodásunk óriási része irányul a fizikai szükségletek és vágyak felé. Ahogyan azt az 5. fejezetben tárgyalni fogom, mire meglesznek az eszközeink az emberi agy teljes lemásolására, rengeteg lehetőségünk lesz a XXI. századi testek közül választani úgy a nem biológiai emberek, mint az intelligenciájuk kiterjesztését választó biológiai emberek számára. Az emberi test v2.0 halmazába realisztikus virtuális környezetben létező virtuális testek, nanotechnológiai alapú fizikai testek és még sokféle egyéb test fog tartozni.

A 3. fejezetben tárgyaltam az emberi agy szimulálásához szükséges memória- és számítási kapacitásra vonatkozó becsléseimet. Noha úgy becsültem, hogy 10^{16} számítás per másodperc számítási teljesítmény és 10^{13} bit memória elég az emberi szintű intelligencia emulálásához, a feltöltésre vonatkozó becsléseim magasabbak: 10^{19} számítás per másodperc és 10^{18} bit. Ennek az az oka, hogy az alacsonyabb értékek az emberi teljesítmény szintjén újraalkotott agyterületekre vonatkoznak, a magasabbak viszont a hozzávetőlegesen 10^{11} idegsejtünk és 10^{14} idegsejtközi kapcsolatunk legapróbb részleteinek a rögzítésére. Amint lehetővé válik a feltöltés, valószínűleg azt fogjuk tapasztalni, hogy a hibrid megoldások is megfelelőek. Például valószínűleg úgy találjuk majd, hogy funkcionálisan elegendő szimulálni bizonyos alapvető támogató funkciókat, mint például az

érzékszervi adatok jelfeldolgozását (standard modulok beiktatásával), a többi szubneurális részletet pedig csak azoknál a területeknél kell rögzíteni, amelyek valóban az egyedi személyiségért és képességekért felelősek. Mindazonáltal a további érvelés során a magasabb becsléseket fogom használni.

Az alapvető számítási erőforrások (10^{19} számítás per szekundum és 10^{18} bit) a 2030-as évek elején, körülbelül egy évtizeddel a funkcionális szimulációhoz szükséges erőforrások után ezer dollárért beszerezhetők lesznek. A feltöltés feltérképezési követelményei szintén komolyabbak, mint az emberi intelligencia „puszta” újraalkotásának esetében. Az emberi agyat elméletileg úgy is fel lehet tölteni, hogy rögzítjük az összes szükséges részletet, de nem feltétlenül ismerjük az agy általános működési elveit. A gyakorlatban viszont ez valószínűleg nem működne. Az emberi agyműködés elveinek a megértése fogja feltárni, mely részletek létfontosságúak és melyek nem. Például tudnunk kell, a neurotranszmitterek mely molekulái kritikusak, és hogy rögzítenünk kell-e az általános szinteket, helyzeteket és elhelyezkedéseket, és/vagy a molekulák alakját. Mint fentebb említettem, még éppen csak kezdjük megtudni, hogy például az emlékezet kulcsát az aktinmolekulák helyzete és a CPEB-molekulák alakja jelenti a szinapszisban. Nem fogjuk tudni megmondani, melyik részlet létfontosságú anélkül, hogy megértenénk az agy működési elvét. Ez a megértés pedig az emberi intelligencia olyan szimulációjából fakadhat, mely átmegy a Turing-teszten – ami szerintem 2029 körül valósulhat meg. ⁽³³²⁾

Az agyműködés ilyen részletességgel való rögzítéséhez szükség lesz a nanobotokat alkalmazó agyi belső képalkotásra, mely technológia a 2020-as évek végére lesz hozzáférhető. Így a 2030-as évek eleje megalapozott dátum a feltöltéshez szükséges számítási teljesítmény, memória és agyi képalkotási követelmények megvalósulására. Mint minden más technológia esetében, itt is szükség lesz iteratív finomításokra a rendszer tökéletesítéséhez, tehát a 2030-as évek vége konzervatív becslés a sikeres feltöltésre.

Rá kell mutatnunk, hogy egy ember személyisége és képességei nem csak az agyban lakoznak, bár kétségtelenül az a fő lakhelyük. Az idegrendszerünk az egész testünket behálózza, és az endokrin (hormonális) rendszer is hatást gyakorol rá. A komplex rendszerek döntő többsége mindazonáltal az agyban található, hiszen az agy alkotja idegrendszerünk túlnyomó részét. Az endokrin rendszerből érkező információk sávszélessége igen alacsony, mivel a meghatározó tényező a hormonok szintje, nem pedig az egyes hormonmolekulák elhelyezkedése.

A feltöltés mérőföldkövének próbája a „Ray Kurzweil” vagy „Jane Smith” Turing-tesztek lesznek – más szóval egy emberi döntőbíró meggyőzése arról, hogy a feltöltött másolat megkülönböztethetetlen az eredeti személytől. Addigra azonban mindenképpen szembe fogunk kerülni bizonyos nehézségekkel, bármilyen Turing-tesztet is terveznénk. Mivel a nem biológiai intelligencia évekkel korábban (2029 körül) túl fog lépni az eredeti Turing-teszten, vajon megengedhetjük-e majd, hogy egy nem biológiai ember legyen a döntőbíró? Vagy egy kiterjesztett intelligenciájú ember? Egyre nehezebben találunk majd nem kiterjesztett intelligenciájú embereket. Akárhogy is, ingoványos terület lesz a kiterjesztettség meghatározása, mivel mire eljutunk a feltöltéshez, a biológiai intelligencia kiterjesztésének számos különböző szintje lesz hozzáférhető. Az is problémát jelent majd, hogy azok az emberek, akiket fel akarunk tölteni, nem fognak a biológiai intelligenciájukra korlátozódni. Ugyanakkor az intelligencia nem biológiai részének a feltöltése viszonylag sima ügy lesz, hiszen a számítógépes intelligencia másolásának a könnyűsége mindig is a számítógépek egyik jellegzetes erőssége volt.

Felmerül a kérdés: milyen gyorsan kell feltérképezni egy ember idegrendszerét? Nyilván nem lehet egyetlen pillanat alatt véghezvinni, és ha minden egyes idegsejtre jut is egy nanobot, akkor is időbe

telik az adatok összegyűjtése. Ennélfogva felmerülhet az az ellenvetés, hogy mivel az ember állapota megváltozik az adatgyűjtés folyamata során, a feltöltendő információ nem egy adott időpillanatban, hanem egy adott időtartamban fogja jellemezni a szóban forgó egyént, még ha ez az időtartam pusztán a másodperc töredéke lesz is.^[333] Ugyanakkor ez a probléma nem befolyásolja azt, hogy a feltöltött személyiség átmegy-e a „Jane Smith” Turing-teszten. A mindennapi kapcsolatainkban is felismernek minket és mi is felismerjük ismerőseinket, pedig talán napok vagy akár hetek is eltelhettek a legutóbbi találkozás óta. Ha a feltöltés kellően pontos ahhoz, hogy lemásolja egy ember állapotát azon természetes változások keretein belül, amelyeken az egyén a másodperc törtrésze, vagy akár néhány perc alatt átmegy, akkor ez az eredmény megfelel bármilyen elképzelhető célnak. Egyes kutatók úgy értelmezték Roger Penrose elméletét a kvantumszámítógépek és a tudat közötti kapcsolatáról (lásd 9. fejezet), hogy aszerint a feltöltés lehetetlen, mert a személy „kvantumállapota” sokszor megváltozik a másolás alatt. Én azonban felhívnom a figyelmüket arra, hogy az én kvantumállapotom is sokszor megváltozott, miközben leírtam ezt a mondatot, és mégis ugyanannak a személynek tartom magam, mint az előző mondat végén (és a környezetemben sem állítja ennek az ellenkezőjét senki).

A Nobel-díjas Gerald Edelman rámutat, hogy különbség van egy képesség és a képesség leírása között. Egy emberről készített fénykép más, mint maga az ember, még ha a „fénykép” nagyon nagy felbontású és háromdimenziós is. Mindazonáltal a feltöltés fogalma túlmutat a rendkívül nagy felbontású képalkotáson, amit Edelman analógiájában a „fényképnek” feleltethetünk meg. A képalkotással szerzett adatoknak nem kell megragadniuk az összes apró részletet, viszont olyan működő számítási közegbe kell kerülniük, ami rendelkezik az eredeti összes képességével (bár az új nem biológiai platformok kétségtelenül sokkal magasabb rendűek lesznek ebből a szempontból). Az idegrendszer részleteinek ugyanúgy kell kölcsönhatásba lépniük egymással (és a külvilággal), mint az eredeti közegben. Helytállóbb analógia a merevlemezen tárolt program (egy statikus kép) és a megfelelő számítógépen aktívan futó program (egy dinamikus, interakcióra képes entitás) összehasonlítása. A feltöltést együttesen alkotják a lemásolt adatok és a dinamikus közeg.

A legfontosabb kérdés talán az lesz, hogy a feltöltött emberi tudatok valóban mi magunk leszünk-e? Még ha a feltöltés át is megy a személyre szabott Turing-teszten, és megkülönböztethetetlennek bizonyul az eredetitől, akkor is joggal merül fel a kérdés, hogy új személyről van-e szó, vagy a régivel megegyezőről? Végül is az eredeti a feltöltéstől függetlenül még létezhet. Ezekre a nagyon fontos kérdésekre a 7. fejezetben fogok kitérni.

Véleményem szerint a feltöltés legfontosabb eleme az, hogy fokozatosan át fogjuk helyezni az intelligenciánkat, a személyiségünket és a képességeinket az intelligenciánk nem biológiai részébe. Már most is számos neurális implantátum létezik. A 2020-as évek végén nanobotokkal fogjuk elkezdni agyunk nem biológiai intelligenciával való megerősítését, kezdve az érzékszervi információk feldolgozásának és az emlékezésnek a „rutinfeladataival”, majd továbblépve az ismeretalkotásra, a mintázatfelismerésre és a logikai analízisre. A 2030-as években intelligenciánk nem biológiai része lesz a domináns, a 2040-es években pedig, ahogyan arra a 3. fejezetben rámutattam, a nem biológiai rész képességei több milliárdszor meg fogják haladni a biológiaiét. Noha egy ideig még valószínűleg meg fogjuk tartani a biológiai részt, egyre kisebb lesz a jelentősége. Tehát fokozatosan, az átmenetet szinte észre sem véve végül teljesen fel fogjuk tölteni magunkat. Nem lesz „régí Ray” és „új Ray”, csak egy egyre több képességgel rendelkező Ray. Bár hiszem, hogy a jövőben működni fog a gyors, a feltérképezést azonnal követő feltöltés, a sokkal magasabb rendű nem biológiai gondolkodásra való fokozatos, de elkerülhetetlen áttérés fogja teljesen átalakítani az emberi civilizációt.

SIGMUND FREUD: *Amikor az emberi agy visszafejtéséről beszél, pontosan kinek az agyára gondol? Egy férfi agyára? Egy nőére? Egy gyerekére? Egy zseniére? Egy szellemi fogyatékoséra? Egy „őrült bölcsére”? Egy tehetséges művésziére? Egy sorozatgyilkoséra?*

RAY: *Végső soron mindegyikére. Vannak alapvető működési elvek, amiket meg kell értenünk az emberi intelligencia és a különböző alkotóképességei működése kapcsán. Az emberi agy nagyon rugalmas, és szó szerint a gondolataink formálják az agyunkat az új dendrittüskék, szinapszisok, dendritek, sőt neuronok növesztése által. Ennek eredményeként Einstein parietális lebenyei – a vizuális képalkotásért és a matematikai gondolkodásért felelős agyterület – nagymértékben megnagyobbodtak.^[334] Mindazonáltal a koponyánk térfogata véges, így Einstein hiába játszott hangszereken, nem volt világszínvonalú zenész. Picasso nem írt remek verseket, és így tovább. Miközben újraalkotjuk az emberi agyat, nem lesznek korlátai annak, hogy mely képességeinket fejlesztjük tökélyre. Nem kell kompromisszumot kötnünk és egy területet fejleszteni a többi kárára.*

A különbségeinkből és a diszfunkciókból is tanulhatunk. Mi romlott el a sorozatgyilkosban? Végül is az agyához kell hogy valami köze legyen. Ez a fajta viselkedés nyilván nem az emésztőrendszer terméke.

MOLLY 2004: *Tudod, nem hiszem, hogy csak a velünk született agyunk felelős a köztünk lévő különbségekért. Mi van a tapasztalatainkkal és mindazzal, amit próbálunk megtanulni?*

RAY: *Nos, igen, ez is része a paradigmának, igaz? Van agyunk, ami képes tanulni, a járástól kezdve a beszédén át az egyetemi szintű kémiáig.*

MARVIN MINSKY: *Igaz, hogy az MI-ink képzése fontos része lesz a folyamatnak, de az nagymértékben automatizálható és így felgyorsítható lesz. Arról se feledkezzünk meg, hogy amikor egy MI megtanul valamit, akkor azonnal meg tudja osztani a tudását a többi MI-vel!*

RAY: *Hozzá fognak férni a weben tárolt, exponenciálisan növekvő tudásunkhoz. A web maga végül lakható, teljes bemerülést nyújtó virtuális valósággá alakul át, amelyben az MI-k kölcsönhatásba léphetnek egymással és a biológiai emberekkel, akik bevetítik magukat ezekbe a környezetekbe.*

SIGMUND: *Az MI-knek egyelőre nincs testük. Ahogy arra mindketten rámutattunk, az emberi érzelmek és az emberi gondolkodás jelentős része az emberi testre, az érzékszervi és szexuális szükségletek kielégítésére irányul.*

RAY: *Ki mondja, hogy nem lesz testük? A 6. fejezetben fogom tárgyalni az emberi test 2.0-s verzióját, és leírom, hogy rendelkezésünkre fognak állni eszközök a nem biológiai, mégis emberszerű testek, illetve a virtuális valóságokban létező virtuális testek megalkotására.*

SIGMUND: *De a virtuális testek nem igazi testek.*

RAY: *Egy kissé szerencsétlen ez a „virtuális” szó. Azt sugallja, hogy „nem igazi”, pedig valójában a virtuális test minden lényeges szempontból épp olyan igazi, mint a fizikai. Mondjuk azt, hogy a telefon egy virtuális valóság a hallás szempontjából. Senki sem érzi úgy, hogy ebben a virtuális környezetben a hangja nem „igazi” hang. Ma a fizikai testemmel nem közvetlenül érzékelem, hogy valaki megérinti a karomat, hanem az agyam kap feldolgozott jeleket a karom idegvégződéseitől, melyek végighaladnak a gerincvelőn, az agytörzsön, fel az inzulákba. Ha az agyam – vagy egy MI agya – hasonló jelzéseket kap arról, hogy valaki virtuálisan megérintette a virtuális karomat, akkor sem lesz észlelhető különbség.*

MARVIN: *Ne feledjük, hogy nem mindegyik MI-nek lesz szüksége emberi testre!*

RAY: *Valóban. Emberként, a rugalmasságuk ellenére a testünknek és az agyunknak is*

viszonylag rögzített az architektúrája.

MOLLY 2004: *Igen, ilyen az emberi lét, és úgy látom, valami gondod van ezzel.*

RAY: *Tulajdonképpen tényleg vannak problémáim az 1.0-s testem korlátaival és karbantartásával, nem is beszélve az agyam korlátairól. De azért igenis értékelem az emberi testtel járó örömöket. Arra akarok kilyukadni, hogy az MI-knek lehet és lesz is emberi testük a valóságban és a virtuális valóságban is. Viszont ahogyan arra Marvin felhívta a figyelmet, nem lesznek pusztán ezekre korlátozva.*

MOLLY 2104: *Nem csak arról van szó, hogy az MI-k felszabadulnak az 1.0-s testek korlátaivalól. A biológiai származású embereknek is ugyanez a szabadság lesz az osztályrészük mind a valóságban, mind a virtuális valóságban.*

GEORGE 2048: *Ne feledjük, nem lesz egyértelmű különbség az MI-k és az emberek között!*

MOLLY 2104: *Igen, kivéve persze a FELÉ-ket (Főleg Eredeti Lényegű Embereket).*

Ötödik fejezet

GNR:

Három, egymást átfedő forradalom

„Kevés dolog van, amire a jelen nemzedéke joggal büszkébb, mint azok a csodálatos fejlesztések, amik nap mint nap történnek a legkülönbébb gépezeteken... De mi lesz, ha a technológia sokkal gyorsabban fog fejlődni, mint a növény- és állatvilág? Átveszi tőlünk az uralmat a világ fölött? Ahogy a növényvilág lassan kifejlődött az ásványiból, és ahogy az állatok felülkerekedtek a növényeken, az elmúlt néhány évtizedben egy teljesen új világ szökkent szárba, amiből még csak azt láttuk, amit egyszer majd a faj őskori prototípusának fognak tartani... Nap mint nap nagyobb hatalmat adunk [a gépeknek], és mindenféle ötletes találmányokkal támogatjuk azt az önszabályozó, önműködő erőt, ami az lesz a gépek számára, ami az intellektus az emberi faj számára.”

(Samuel Butler, 1863

[Négy évvel

Darwin A fajok eredete című művének megjelenése után])

„Ki lesz az ember utódja? Erre a kérdésre ez a válasz: Mi magunk teremtyük meg az utódainkat. Az ember az lesz a gépnek, ami a ló és a kutya az embernek; azaz a gépek élők, vagy fokozatosan azzá válnak.”

(Samuel Butler, levélrészlet, 1863, „Darwin Among the Machines”

[Darwin a gépek között])⁽³³⁵⁾

A XXI. század első felét három, egymást átfedő forradalom fogja jellemezni – a genetika, a nanotechnológia és a robotika forradalma. Ezek fogják elhozni a korábban említett ötödik korszakot, a szingularitás kezdetét. Ma a „G” forradalom korai szakaszában vagyunk. Az élet mögött rejlő információs folyamatok megértése révén kezdjük megtanulni biológiánk átprogramozását, hogy gyakorlatilag megszüntessük a betegségeket, drámaian megnöveljük az emberi képességeket, és radikálisan meghosszabbítsuk az életet. Ugyanakkor Hans Moravec rámutat, hogy mindegy, milyen sikeresen hangoljuk át DNS-alapú biológiánkat, az emberek „másodrendű robotok” maradnak, ami azt jelenti, hogy a biológia soha nem lesz képes felvenni a versenyt azzal, amit a technológia révén létre tudunk majd hozni, amint teljes mértékben megértjük a biológia működési elveit.⁽³³⁶⁾

Az „N” forradalom lehetővé fogja tenni, hogy áttervezzük és molekuláról molekulára átépítsük a testünket, az agyunkat és a világot, amelyben létezünk, messze meghaladva a biológiai korlátokat. A legnagyobb közelgő forradalom az „R”: az emberi szintű robotok intelligenciája a miénkből fog származni, de messze meg fogja haladni az emberi képességeket. Az „R” képviseli a legjelentősebb átalakulást, mivel az intelligencia a leghatalmasabb „erő” a világegyetemben. A kellően fejlett

intelligencia képes előre jelezni és leküzdeni bármilyen akadályt, ami az útjába kerül.

Noha mindegyik forradalom meg fogja oldani a korábbi átalakulások nyomán keletkezett problémákat, új veszélyeket is magával fog hozni. A „G” leszámol a betegségekkel és az öregedéssel, de egyben alapul szolgál új, biológiailag tervezett vírusfenyegetéseknek is. A teljes mértékben kifejllett „N” képes lesz megvédeni minket minden biológiai veszélytől, de megteremti a saját önszaporodó fenyegetését, ami sokkal nagyobb lesz, mint bármilyen biológiai veszély. A teljesen kifejllett „R” révén meg fogjuk tudni védeni magunkat ezektől a fenyegetésektől, de mi fog megvédeni minket a miénket meghaladó, beteges intelligenciától? Van stratégiám ezeknek a problémáknak a megoldására, a 8. fejezet végén fejtem ki részletesen. Ebben a fejezetben azt vizsgálom meg, hogyan fog kibontakozni a szingularitás a három egymást átfedő forradalom, a „G”, az „N” és az „R” révén.

Genetika: az információ és a biológia metszete

„Nem kerülte el a figyelmünket, hogy az általunk posztulált párosításból azonnal következik a genetikai anyag egy lehetséges másolási mechanizmusa.”

(James Watson és Francis Crick^[337])

„Hárommilliárd év evolúció után itt van előttünk az utasításkészlet, amely révén egysejtű petesejtből a felnőttkoron át mind eljutunk a sírig.”

(Dr. Robert Waterson,

International Human Genome Sequence Consortium^[338])

Az élet összes csodája és a betegségek összes nyomorúsága mögött meglepően tömör információs folyamatok, lényegében szoftverek rejlenek. Az egész emberi genom egy szekvenciális bináris kód, amely mindössze nyolcszázmillió byte információt tartalmaz. Mint korábban említettem, amikor hagyományos tömörítési eljárásokkal megszüntetjük óriási redundanciáját, mindössze harmincszázmillió byte marad, ami megfelel egy mai átlagos számítógépes szoftver méretének.^[339] Ezt a kódot egy sor biokémiai gépezet támogatja, amelyek lefordítják ezeket a lineáris (egydimenziós) DNS-szekvencia „betűket” egyszerű építőelemekből álló karaktersorozatokká, amelyeket aminosavaknak nevezünk, és amelyek ezután háromdimenziós fehérjékké szerveződnek. Ezek a fehérjék alkotnak minden élőlényt, a baktériumoktól az emberig. (A vírusok az élő és élettelen anyag között helyezkednek el, de szintén DNS- és RNS-fragmentumokból állnak.) Ez a gépezet lényegében egy önmagát replikáló, nano nagyságrendű replikátor, amely felépíti mindazokat a bonyolult hierarchiájú struktúrákat és egyre összetettebb rendszereket, amelyekből egy élőlény áll.

Az élet számítógépe

Az evolúció legkorábbi szakaszaiban az információ egyre bonyolultabb, szénelapú szerves molekulák struktúráiba volt kódolva. A biológia több milliárd év eltelte után kifejlesztette a saját számítógépét a DNS-molekulán alapuló digitális adatok tárolására és manipulálására. A DNS-molekula kémiai struktúráját először J. D. Watson és F. H. C. Crick írta le 1953-ban, mint két polinukleotid szálból álló kettős hélixet.^[340] A genetikai kód megfejtését ennek a századnak az elején fejeztük be. Most már kezdjük megérteni azoknak a kommunikációs és szabályozó folyamatoknak a részletes kémiáját, amelyek révén a DNS a szaporodást vezérli olyan egyéb összetett molekulákon és sejtstruktúrákon keresztül, mint a hírvivő RNS (mRNS), a transzfer RNS (tRNS) és a riboszómák.

Az információtárolás szintjén a mechanizmus meglepően egyszerű. A csavarodó cukorfoszfát gerincre

támaszkodó DNS-molekula több millió „létrafokból” áll, melyek mindegyikét egy négybetűs ábécé valamelyik betűjével jelölik, s így mindegyik „létrafok” két bit adatot kódol egy egydimenziós digitális kódban. Az ábécét a négy bázispár alkotja: az adenin-timin, a timin-adenin, a citozin-guanin és a guanin-citozin. Egy sejt DNS-szálainak a hossza hat láb (kb. 180 cm) lenne kiegyenesítve, de egy bonyolult csomagolási módszernek köszönhetően összetekerve elférnek egy mindössze 1/2500 hüvelyk (kb. 0,01 mm) átmérőjű sejtmagban.

Speciális enzimek képesek lemásolni az egyes létrafokok információját úgy, hogy kettéhasítják a bázispárokat, majd a törött bázispárok újbóli összeillesztésével összeraknak két azonos DNS-molekulát. Más enzimek a másolás helyességét ellenőrzik a bázispár-megfelelés integritásának ellenőrzésével. Ezekkel a másoló és ellenőrző lépésekkel ez a kémiai adatfeldolgozó rendszer körülbelül egy hibát ejt tízmilliárd bázispár-replikáció során.^[341] Magában a digitális adatban további redundanciák és hibajavító kódok találhatóak, így ritkák a bázispár-replikáció hibából eredő értelmes mutációk. A tízmilliárd:egy hibaarányból származó hibák többsége a „paritáshiba” megfelelőjét eredményezi, amit a rendszer többi része érzékel és korrigál, beleértve a megfelelő kromoszómával való összehasonlítást is, ami meggátolja, hogy a hibás bit bármilyen jelentős kárt okozzon.^[342] A legújabb kutatások kimutatták, hogy a genetikai mechanizmus úgy érzékeli az ilyen hibákat a férfi Y kromoszóma átírásában, hogy minden egyes Y kromoszómás gént összehasonlít ugyanannak a kromoszómának a másolatával.^[343] Időnként, nagyon-nagyon ritkán egy átírási hiba előnyös változást eredményez, amit az evolúció kihasznál.

A transzlációnak (fordításnak) nevezett folyamat során egy sor egyéb vegyület működésbe hozhatja ezt a bonyolult digitális programot, fehérjéket építve általa. A fehérjeláncok adják meg minden sejtnak a struktúráját, a viselkedését és az intelligenciáját. Különleges enzimek kibontják a DNS egyes szakaszait, hogy felépítsenek egy adott fehérjét. A feltárt bázisszekvencia lemásolásával létrejön egy mRNS szál. Az mRNS lényegében rendelkezik a DNS-betűszekvencia adott részének a másolatával. Az mRNS kilép a sejtmagból a sejttestbe. Egy riboszóma, a biológiai reprodukció drámájának molekuláris főszereplője ezután kiolvassa az mRNS kódjait. A riboszóma egyik része úgy működik, mint egy magnetofon lejátszófeje, „leolvassa” az mRNS-bázisszekvenciában kódolt adatsort. A „betűk” hárombetűs, kodonnak nevezett szavakba rendeződnek, és minden kodon egyet jelöl húszt lehetséges aminosav, a fehérjék alapvető építőelemei közül. Egy riboszóma kiolvassa a kodonokat az mRNS-ből, majd a tRNS-t felhasználva, sorra véve az aminosavakat, felépíti a fehérjeláncot.



A folyamat figyelemre méltó utolsó lépése az, ahogy az aminosav „gyöngyök” egydimenziós lánc háromdimenziós fehérjévé tekeredik össze. Ezt a folyamatot még nem sikerült szimulálni, annyira hihetetlenül bonyolult az összes érintett atomból származó erők kölcsönhatása. A körülbelül ennek a könyvnek a megjelenésére (2005) tervezett szuperszámítógépeknek már lesz akkora teljesítménye, hogy szimulálni lehessen rajtuk a fehérjefeltekeredést (a protein foldingot), illetve a háromdimenziós fehérjék egymás közötti kölcsönhatásait.^[9]

A fehérjefeltekeredés és a sejtosztódás a természet figyelemre méltó, kifinomult tánca az élet teremtésében és újrateremtésében. Speciális „dajka”-molekulák védik és vezetik az aminosavszálakat, miközben azok felveszik pontos háromdimenziós fehérjekonfigurációjukat. A létrejövő fehérjemolekulák közel egyharmada hibásan hajlik össze. Ezeket a torz fehérjéket azonnal meg kell semmisíteni, különben gyorsan felgyűlnek, és több szinten meggátolják a sejtműködést.

Közönséges körülmények között a hibás fehérjéket azonnal megjelöli egy hordozómolekula, az ubikvitin, és elkíséri egy specializálódott proteaszómához, ami lebontja azt aminosavakká, hogy utóbbiakból ismét új (nem hibás) fehérjék jöjjenek létre. Ugyanakkor, ahogy öregsznek a sejtek, egyre kevesebb energiát termelnek, amire szükség van ennek a mechanizmusnak az optimális működéséhez. A felgyűlt torz fehérjék úgynevezett protofibrillumokat hoznak létre. Úgy vélik, ezek a protofibrillumok állnak az Alzheimer-kórhoz és egyéb betegségekhez vezető folyamatok hátterében.^[344]

Az atomi szintű kölcsönhatások háromdimenziós keringőjének szimulálására való képesség nagymértékben fel fogja gyorsítani annak a megismerését, hogy a DNS-szekvenciák hogyan szabályozzák az életet és a betegségeket. Akkor képesek leszük gyors szimulációkban ellenőrizni olyan gyógyszerek hatásait, amelyek beavatkoznak a folyamat valamelyik lépésébe, és így felgyorsul a gyógyszerfejlesztés és a célzott, minimális mellékhatásokkal bíró gyógyszerek létrehozása. Az összeállított fehérjék feladata a sejt, tágabb értelemben véve pedig az egész organizmus funkcióinak végrehajtása. Például hemoglobin-molekulából, amelynek az a feladata, hogy elszállítsa az oxigént a tüdőből a szövetekhez, másodpercenként ötszázbillió keletkezik az emberi testben. Mivel minden egyes hemoglobin-molekulában több mint ötszáz aminosav van, a riboszómák csak a hemoglobin előállításánál során $1,5 \times 10^{19}$ (tizenötmilliárdszor milliárd) „olvasási” műveletet hajtanak végre percenként.

Az élet biokémiai mechanizmusa bizonyos szempontból figyelemreméltóan bonyolult és összetett. Más szempontból viszont meglepően egyszerű. Mindössze négy bázispár biztosítja az összes emberi és egyéb, általunk ismert élet teljes komplexitásának a digitális tárolását. A riboszómák három bázispárból álló csoportokat összeillesztve építik fel a fehérjeláncokat, hogy mindössze húsz aminosavból válasszák ki a szekvenciákat. Maguk az aminosavak viszonylag egyszerűek: egy négy vegyértékű szénatomból állnak, amely egy hidrogénatomhoz, egy aminocsoporthoz ($-NH_2$), egy karboxilcsoporthoz ($-COOH$) és egy szerves oldallánchoz kapcsolódik, amely minden aminosavnál más. Például az alanin oldallánca mindössze négy atom (CH_3-) az összesen tizenháromból. Az egyik bonyolultabb aminosavnak, az argininnek (amely létfontosságú szerepet játszik az artériáinkban található belhámsejtek egészsége szempontjából) mindössze tizenhét atom van a szerves csoportjában, és összesen huszonhat atomból áll. Ez a húsz egyszerű molekula minden élet építőeleme.

Ezután a fehérjeláncok szabályoznak minden mást: a csontsejtek szerkezetét, az izomsejtek képességét a megfeszülésre és a többi izomsejttel való együttműködésre, az összes bonyolult biokémiai kölcsönhatást, amelyek a vérkeringésben zajlanak, valamint természetesen az agy struktúráját és működését.^[345]

Tervezett egészségmegőrzés

Már ma is elegendő információ áll rendelkezésünkre a betegségek és az öregedési folyamatok olyan mértékű lelassításához, hogy nemzedékem hozzám hasonló képviselői jó egészségben megérjék a biotechnológiai forradalmat, ami önmagában is híd lesz a nanotechnológiai forradalomhoz (lásd: *Források és kapcsolat*). A *Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever* (Fantasztikus utazás: élj olyan sokáig, hogy örökké élj) című könyvben, amelyet dr. Terry Grossman vezető hosszúélet-kutatóval közösen írtunk, részletesen tárgyaljuk ezt a három hidat (a mai tudás, a biotechnológia és a nanotechnológia) a radikális életmegg hosszabbításához.^[346] Akkor ezt írtam: „Lehet, hogy a korombeliek megelégszenek azzal, hogy kegyesen elfogadják az öregedést, mint az élet körforgásának a részét, de én más állásponton vagyok. Lehet, hogy az öregedés »természetes«, de

semmi pozitívat nem látok a szellemi frissességem, az érzékszerveim élessége, a fizikai állóképességem, a szexuális vágyam vagy bármely más emberi képességem elvesztésében. A betegséget és a halált minden életkorban sorscsapásnak, megoldandó problémának látom.”

Az első híd azt jelenti, hogy agresszíven alkalmazzuk mindazt a tudást, ami a rendelkezésünkre áll, hogy drámaian lelassítsuk az öregedést és visszafordítsuk a legsúlyosabb betegségek, például a szívbetegségek, a rák, a 2-es típusú cukorbetegség és a keringési traumák folyamatait. Gyakorlatilag átprogramozhatjuk a biokémiánkat, ugyanis rendelkezésünkre áll a tudás ahhoz, hogy ha agresszíven alkalmazzuk, az esetek döntő többségében legyőzzük a genetikai örökségünket. A „nagyreszt a gének tehetnek róla” kijelentés csak akkor igaz, ha a szokásos belenyugvó attitűddel viszonyulunk az egészséghez és az öregedéshez.

A saját történetem is tanulságos. Több mint húsz évvel ezelőtt 2-es típusú cukorbetegséget diagnosztizáltak nálam. A hagyományos kezeléstől csak romlott az állapotom, ezért a saját szemszögemből, a feltaláló szemszögéből közelítettem meg ezt az egészségi problémát. Elmélyedtem a szakirodalomban, és kidolgoztam egy egyedi programot, ami sikeresen visszafordította a cukorbetegségemet. 1993-ban írtam egy könyvet (*The 10% Solution for a Healthy Life* [A 10 százalékos megoldás az egészséges életre]) erről a tapasztalatról, és mindmáig mentes vagyok a betegség bármely tünetétől vagy szövődményétől.^[347]

Emellett huszonkét éves koromban, szívbetegségben, ötvennyolc évesen meghalt apám, és kiderült, hogy örököltém a génjeit, melyek hajlamosítanak erre a betegségekre. Húsz évvel ezelőtt, annak ellenére, hogy követtem az Amerikai Szívegészségi Társaság útmutatását, a koleszterinem a 200-as tartományban volt (jóval 180 alatt kellett volna lennie), a HDL-em (nagy sűrűségű lipoprotein, a „jó” koleszterin) pedig 30 alatt (50 felett kellett volna lennie), a homociszteinem (a metilálásnak nevezett kémiai folyamat egészséges működésének mérőfoka) az egészségtelen 11 értéket mutatta (7,5 alatt kellett volna lennie). Azt a hosszú élet programot követve, amelyet Grossmannal fejlesztettünk ki, a jelenlegi koleszterinszintem 130, a HDL-em 55, a homociszteinem 6,2, a C-reaktív fehérjém (a testben lévő gyulladások mérője) a nagyon egészséges 0,01, és az összes többi mutatóm (a szívbetegségekre, a cukorbetegségekre és egyéb betegségekre) mind ideális szinten van.^[348]

Negyvenéves koromban a biológiai korom harmincnyolc év körül volt. Noha most ötvenhat éves vagyok, a biológiai korom átfogó tesztje (ami az érzékszervek állapotát, a tüdőkapacitást, a reakcióidőt, az emlékezetet méri) Grossman hosszúélet-klinikáján negyvenévesnek mutatta a biológiai koromat.^[349] Bár nincs még konszenzus azt illetően, hogyan kell mérni a biológiai életkort, a teszteken elért eredményeim az ilyen korú népesség átlagértékeinek feleltek meg. Tehát ezek szerint a tesztek szerint nem sokat öregedtem az elmúlt tizenhat évben, amit sok vérkép is alátámasztott, és az is, ahogyan érzem magam.

Ezek az eredmények nem a véletlen művei; nagyon agresszíven elkezdtem átprogramozni a biokémiámat. Naponta 250-féle táplálékkiegészítőt veszek be (tabletta formájában), és hetente fél tucat intravénás kezelést kapok (alapvetően tápanyag-kiegészítőket, közvetlenül a vérkeringésembe, kikerülve az emésztőrendszeremet). Ennek eredményeképpen a testem anyagcsere-folyamatai teljesen mások, mind egyébként lennének.^[350] Mérnökként közelítve a problémához több tucatnyi tápanyag (vitaminok, ásványi anyagok és zsírok), hormonok és anyagcsere-melléktermékek szintjét mérem a véremben és egyéb mintákban (például a hajamban és a nyálamban). Összességében minden olyan szinten van, amilyenén szeretném, bár folyamatosan módosítom a programomat a Grossmannal együtt végzett kutatások alapján.^[351] Noha a programom szélsőségesnek tűnhet, valójában konzervatív – és optimális (a jelenlegi tudásom alapján). Grossman és én biztonság és hatékonyság szempontjából mélyrehatóan tanulmányoztuk azt a több száz terápiát, amelyet használok. Távol tartom magam a nem

bizonyított vagy kockázatosnak tűnő ötletektől (például az emberi növekedési hormon használatától).

A betegségek veszélyes előrehaladásának visszafordítását és legyőzését háborúként fogjuk fel. Mint minden háborúban, ebben is fontos mozgósítani az összes hírszerzési eszközt és fegyvert, amit csak lehet, és mindennel rá kell támadni az ellenségre, amink csak van. Ezért azt hirdetjük, hogy a legveszélyesebb betegségeket – a szívbetegségeket, a rákot, a cukorbetegséget, a keringési betegségeket és az öregedést – több fronton kell megtámadni. Például a szívbetegség megelőzésére az a stratégiánk, hogy tíz különböző szívbetegség-megelőző terápiát alkalmazunk, melyek együtt az összes ismert kockázati tényezőt megcélazzák.

Ilyen sokrétű stratégiák alkalmazásával a második világháború után született nemzedék összes tagja megőrizheti egészségét minden betegséggel és az öregedés minden folyamatával szemben a biotechnológiai forradalom teljes kibontakozásáig (amit kettes hídnak nevezünk), amely már elkezdődött, és ennek az évszázadnak a második évtizedében fogja elérni a tetőpontját.

A biotechnológia biztosítani fogja az eszközöket ahhoz, hogy ténylegesen megváltoztassuk a génjeinket: nemcsak tervezett csecsemők lesznek, hanem tervezett felnőttek is. Arra is képesek leszünk, hogy megfiatalítsuk a test összes szövetét és szervét azáltal, hogy a bőrsejteket minden más sejttípus fiatal változatává alakítjuk át. A gyógyszerkutatások már most megcélolták az ateroszklerózist (érelmeszesedést – a szívbetegségek egyik fő okát), a rákos tumorképződést és a súlyosabb betegségeket, illetve az öregedés folyamata mögött rejlő anyagcsere-folyamatokat.

Valóban örökké élhetünk? Aubrey de Grey, a Cambridge Egyetem genetikai tanszékének tudósa energikus és nagy tudású hirdetője annak, hogy a biológia mögött rejlő információs folyamatok megváltoztatásával meg lehet állítani az öregedést. De Grey a ház karbantartásának a metaforáját használja. Meddig áll egy ház? Ez nyilván attól függ, hogy mennyire viseljük gondját. Ha nem csinálunk semmit, előbb-utóbb elkezd beázni a tető, betörnek az elemek, és végül az egész ház leomlik. Ha azonban aktívan gondoskodunk az épületről, kijavítunk minden hibát, szembenézünk minden veszéllyel, és időről időre új anyagokból, új technológiákkal újjáépítjük vagy felújítjuk az egyes részeit, a ház élettartama gyakorlatilag korlátlanul meghosszabbítható.

Ugyanez áll a testünkre és az agyunkra is. Az egyetlen különbség az, hogy a ház karbantartásának módszereit tökéletesen ismerjük, az élet biológiai alapelveit viszont még nem. A biokémiai folyamatok és a biológiai ösvények egyre jobb és egyre gyorsuló megértése révén hamarosan szert teszünk a szükséges tudásra. Kezdjük megérteni, hogy az öregedés nem egyetlen megállíthatatlan folyamat, hanem több, egymással összefüggésben lévő folyamat együttese. Ezeknek az öregedési folyamatoknak a feltárásából stratégiák születnek, melyek a biotechnológiai technikák különböző kombinációit alkalmazzák.

De Grey „tervezett, elhanyagolható fokú öregedésnek” nevezi a célját – meg akarja akadályozni, hogy a test és az agy az idő múlásával egyre törékenyebb és betegesebb legyen.^{352} „Már a birtokunkban van minden tudás, hogy kifejlesszük a *tervezett, elhanyagolható fokú öregedést* – magyarázza –, csak össze kell rakni a darabokat.”^{353} Úgy véli, tíz éven belül „nagyértékben megfiatalított” egereket fogunk bemutatni – egereket, amelyek fiatalabb szinten fognak működni, mint a kezelés előtt, és az életük is hosszabb lesz –, és felhívja a figyelmet arra, hogy ez az eredmény drámai hatással lesz a közvéleményre. Annak bizonyítása, hogy meg tudjuk fordítani az öregedés folyamatát egy olyan állatban, amelynek a génekészlete 99 százalékban megegyezik a miénkkel, meg fogja rendíteni a közfelfogást, miszerint az öregedés és a halál elkerülhetetlen. Miután az állatokon bizonyítást nyer a jelentős megfiatalítás lehetősége, óriási versenynyomás fog kialakulni ezeknek az

eredményeknek az emberi terápiákba való átültetésére, és ez öt-tíz évvel később meg is fog valósulni.

A biotechnológia sokszínű tudományát a biológia mögött rejlő információs folyamatok egyre gyorsuló visszafejtése és az ezeket a folyamatokat módosítani képes eszközök bővülő arzenálja hajtja. Például a gyógyszerkutatás régen arról szólt, hogy megkeressék azokat az anyagokat, amelyek valamilyen jótékony hatással bírnak, túlzott mellékhatások nélkül. Ez a folyamat hasonlított az őseMBER szerszámfelfedezéseihez, ami kimerült abban, hogy követek és egyéb természetes eszközöket keresett bizonyos célok eléréséhez. Ma kezdjük pontosan megismerni azokat a biológiai ösvényeket, melyek a betegségek és az öregedési folyamatok mögött rejlenek, és képesek vagyunk olyan gyógyszereket tervezni, melyek molekuláris szinten fejtik ki pontos hatásukat. Ezek a törekvések óriási területeket ölelnek fel.

A másik erőteljes megközelítés iránya a biológia információs gerince, a genom lehet. A közelmúltban kifejlesztett géntechnológiai eljárásoknak köszönhetően annak a határán állunk, hogy befolyásolni tudjuk a génexpressziót. A génexpresszió az a folyamat, mely révén adott sejtalkotórészek (konkrétan az RNS és a riboszómák) egy adott genetikai mintát követve fehérjéket hoznak létre. Noha az emberi test minden sejtje tartalmazza a test génjeinek összességét, egy adott sejt, például egy hámsejt vagy egy hasnyálmirigy-szigetsejt csak a genetikai információ rá vonatkozó töredék részéből kapja meg a jellemzőit.^[354] Ennek a folyamatnak a terápiás irányítása történhet a sejtmagon kívül, azaz könnyebben kivitelezhető, mint a sejtmagon belüli terápiák.

A génexpressziót peptidek (maximum száz aminosavból álló molekulák) és rövid RNS-szálak szabályozzák. Most kezdjük megismerni, hogyan működnek ezek a folyamatok.^[355] Sok új, jelenleg fejlesztés és tesztelés alatt álló terápia alapul azon, hogy a peptidek manipulálásával vagy kikapcsoltatja velük a betegséget okozó gének expresszióját, vagy bekapcsoltatja a kívánatos géneket, amelyek egyébként nem expresszálnódnának egy adott sejtípusban.

RNSi (RNS-interferencia). Egy hatékony, új eszköz, az RNS-interferencia (RNSi) képes úgy kikapcsolni adott géneket, hogy blokkolja az mRNS-üket, s ezzel meggátolja, hogy fehérjéket hozzanak létre. Mivel a vírusfertőzések, a rák és sok egyéb betegség génexpressziót használ életeciklusa valamelyik kritikus pontján, az RNSi technológiai áttörés ígéretét hordozza. A kutatók rövid, kétszálú DNS-szakaszokat hoznak létre, amelyek megegyeznek a célba vett génekből átirrt RNS-részekkel, és hozzákapcsolódnak azokhoz. A fehérjealkotó képessége kiiktatásával a gén gyakorlatilag elnémul. Sok genetikai betegség esetében csak az adott gén egyik másolata hibás. Mivel minden génről két másolat készül, egy-egy a két szülőtől, a betegséget okozó gén blokkolása után csak az egészséges gén tudja létrehozni a szükséges fehérjét. Ha mindkét gén hibás, az RNSi mindkettőt elnémítja, de ekkor kívülről kell bejuttatni egy egészséges gént.^[356]

Sejtterápiák. Egy másik fontos támadási irány a sejtjeink, szöveteink, sőt akár teljes szerveink újránövesztése és testünkbe ültetése sebészeti beavatkozás nélkül. Ennek a „terápiás klónozás” technikának az egyik fő előnye az, hogy ezeket az új szöveteket és szerveket a saját sejtjeinkből leszünk képesek létrehozni, amiket a kialakulófélben lévő fiatalító orvoslás révén már fiatalabbakká tettünk. Például képesek leszünk új szívsejteket létrehozni hámsejtekből, és a vérkeringésen keresztül bejuttatni őket a szervezetbe. Idővel a meglévő szívsejtek helyét átveszik az új sejtek, és kapunk egy megfiatalított, „új” szívet, amit a saját DNS-ünk felhasználásával hoztunk létre. A testünk újránövesztésének ezt a megközelítését lentebb még tárgyalom.

Génchipek. Az új terápiák csak egyet fognak jelenteni a számtalan mód közül, amelyek által génexpresszióról szerzett egyre gyarapodó tudásunk drámaian javítani fogja az egészségünket. Az 1990-es évek óta használnak ötcentesnél nem nagyobb *microarray*-ket, vagy chipeket a több ezernyi gén expressziómintázatának egy időben történő tanulmányozására és összehasonlítására.^[357] A technológia lehetséges alkalmazási területei annyira sokfélék, és a technológiai akadályok oly mértékben lecsökkentek, hogy ma már hatalmas adatbázisokban tárolják a „csináld magad génfigyelés” eredményeit.^[358]

A genetikai profilozást ma arra használják, hogy:

- *Forradalmasítsák a gyógyszerek felfedezésének és hatásvizsgálatának a folyamatát.* A *microarray*-k „nemcsak igazolják egy hatóanyag működési mechanizmusát”, hanem „különbséget tesznek az anyagcsere különböző fázisaiban működésbe lépő hatóanyagok között is”.^[359]
- *Pontosítsák a rák típusainak osztályozását.* Egy, a *Science* magazinban megjelent tanulmány bebizonyította, hogy egyes leukémiafajtákat lehetséges „pusztán a génexpresszió megfigyelése révén” kategorizálni. A szerzők bemutattak egy esetet, amelyben az expresszió profilozása nyomán korrigálni lehetett egy téves diagnózist.^[360]
- *Azonosítsák az öregedésben vagy a tumorképződésben részt vevő géneket, sejteket és pályákat.* Például egy kutatás segített új terápiás célterületeket azonosítani azzal, hogy korrelációt fedezett fel az akut mieloid leukémia és bizonyos gének programozott sejtelhalás közben tapasztalt fokozott expressziója között.^[361]
- *Meghatározzák egy új terápia hatékonyságát.* Egy nemrég a *Bone* magazinban megjelent tanulmány a növekedési hormon pótlásának az inzulinszerű növekedési faktorok (IGF-ek) és a csont anyagcseremarkereinek expressziójára gyakorolt hatását vizsgálta.^[362]
- *Gyorsan, állatkísérletek nélkül meghatározzák az élelmiszer-adalékanyagok, kozmetikai szerek és ipari termékek toxikusságát.* Az ilyen tesztek például kimutathatják, mennyire kapcsolja be vagy ki az egyes géneket a tesztelt anyag.^[363]

Szomatikus génterápia (a nem reproduktív sejtek génterápiája). Ez a biomérnökség Szent Grálja, ami lehetővé fogja tenni, hogy megváltoztassuk a sejtmagban lévő géneket azáltal, hogy új DNS-sel „fertőzzük meg” a sejtet, s ezzel gyakorlatilag új géneket hozunk létre.^[364] Az emberek génkészletének ellenőrzését gyakran összekapcsolják azzal az elképzeléssel, hogy befolyásoljuk az új nemzedékek, a „tervezett csecsemők” tulajdonságait. A génterápia igazi ígérete azonban génjeink születés utáni, felnőttkorban történő megváltoztatása.^[365] Blokkolhatjuk a nemkívánatos, betegségekre hajlamosító géneket, vagy újakat hozhatunk létre, amelyek lelassítják, vagy akár megfordítják az öregedés folyamatát.

Az 1970-es és az 1980-as években elkezdődött állatkísérletek nyomán sok transzgenikus állat jött létre, például szarvasmarhák, baromfik, nyulak és tengeri sünök. Az emberi génterápiára irányuló első próbálkozások 1990-ben történtek. A kihívást az jelenti, hogy terápiás DNS-t juttassunk a megcélzott sejtekbe, melyek aztán a megfelelő szinten és a megfelelő időben expresszálódnak.

Gondoljuk végig a géntranszfer problémáit! Gyakran a vírusok a legmegfelelőbb hordozók. A vírusok már rég megtanulták, hogyan juttassák be a genetikai anyagukat az emberi sejtekbe, s hogyan okozzanak ezzel betegségeket. A kutatók ma egyszerűen kicserélik a vírus által a sejtekbe juttatott anyagot, eltávolítják az eredeti génjeit, és terápiás géneket tesznek a helyükre. Noha maga a módszer viszonylag egyszerű, a gének sokszor túl nagyok ahhoz, hogy bizonyos sejtípusokba (például az

agysejtekbe) bejussanak. Az eljárásnak korlátokat szab a szállítható DNS hossza, illetve az esetlegesen kiváltott immunreakció is. Azt pedig nagyon nehéz pontosan szabályozni, hogy az új DNS hol integrálódjon a sejt DNS-ébe.^[366]

A DNS fizikai befecskendezése (mikrobefecskendezés) a sejtekbe lehetséges, de rendkívül drága eljárás. Ugyanakkor a közelmúltban izgalmas előrelépések történtek az egyéb átviteli eljárások területén. Például a liposzómákat – vizes közepű zsírgömbök – „molekuláris trójai falovakként” lehet felhasználni arra, hogy géneket juttassanak az agysejtekbe, s így megnyissák a kaput a Parkinson-kór és az epilepszia kezelése előtt.^[367] Többféle molekulát (gyógyszerfehérjét, RNS-t és DNS-t) elektromos impulzusokkal is be lehet juttatni a sejtekbe.^[368] Egy másik lehetőség az, hogy a DNS-t parányi „nanogolyókba” csomagolják a maximális hatás érdekében.^[369]

A legnagyobb akadály, amit a génterápiának le kell küzdenie ahhoz, hogy embereken is alkalmazható legyen, a gén megfelelő pozicionálása a DNS-szálon, és a génexpresszió nyomon követése. Az egyik lehetséges megoldás az, hogy egy riportergént is küldünk a terápiás génnel, melyet aztán képalkotó eljárással megfigyelünk. A képi információ lehetővé tenné, hogy felügyeljük a gén elhelyezését és az expresszió szintjét is.^[370]

A génterápia mindezen akadályok ellenére már emberi alkalmazási területeken is elkezdett működni. A Glasgow-i Egyetem kutatóorvosa, Andrew H. Baker által vezetett csoport sikeresen használt fel adenovírusokat egyes szervek, sőt egyes szervek meghatározott területeinek a „megfertőzésére”. A kutatócsoport például képes volt pontosan az erek belső burkolatát alkotó endotélsejtekre irányítani a génterápiát. A Celera Genomics, Craig Venter (az emberi genom megfejtésére irányuló, magánjellegű próbálkozások vezetője) cége más módszert dolgozott ki. A Celera bebizonyította, hogy képes genetikai információk alapján mesterséges vírusokat előállítani, és ezeket a biológiai tervezésű vírusokat akarja felhasználni a génterápiában.^[371]

Az egyik cég, amelynek részt veszek a vezetésében, a United Therapeutics, már elkezdte embereken tesztelni azt a módszert, hogy az autológ őssejtek (a páciens saját őssejtjei) mechanizmusa révén juttatja be a DNS-t a sejtekbe. Az őssejteket néhány kémcsőnyi vérből nyerik ki. Az őssejtgénekbe olyan DNS-t juttatnak, ami az új tüdőerek növekedését szabályozza, és a sejteket visszafecskendezik a páciensbe. Amikor a genetikailag módosított őssejtek elérnek a parányi tüdőhajszálerekhez a tüdő léghólyagjai mellett, elkezdenek növekedési faktorokat expresszálni az új erek számára. Az állatkísérletekben ez biztonságosan visszafordította a pulmonáris hipertenziót, egy végzetes és jelenleg gyógyíthatatlan betegséget. Ezeknek a kutatásoknak a sikere és biztonságossága alapján a kanadai kormány engedélyezte, hogy 2005 elején megkezdődjenek az emberi alanyokon végzett kísérletek.

Degeneratív betegségek visszafordítása

Társadalmunkban az elhalálozások kilencven százalékaért a degeneratív (progresszív) betegségek – a szívbetegségek, a keringési betegségek, a rák, a 2-es típusú cukorbetegség, a májbetegség és a vesebetegség – a felelősek. A degeneratív betegségekről és az öregedés fő elemeiről szerzett ismereteink egyre gyarapodnak, és stratégiák születtek ezeknek a folyamatoknak a megállítására, sőt visszafordítására. A *Fantastic Voyage*-ban Grossmannal számos, jelenleg tesztelés alatt álló terápiát ismertetünk, melyek már most jelentős eredményeket hoztak az ilyen betegségek mögött rejlő folyamatok kulcsfontosságú biológiai lépéseinek a megtámadásában.

Küzdelem a szívbetegség ellen. A számos példa egyikeként izgalmas kutatások folynak egy szintetikus HDL-koleszterinnel, a rekombináns Apo-A-I-vel (AAIM). Az állatkísérletek során az AAIM nyomán gyorsan és drámaian csökkent az ateroszklerotikus plakk mennyisége.^[372] A Szövetségi Gyógyszerügynökség első fázisú tesztjei során, melyekben negyvenhét vizsgálati személy vett részt, az intravénásan adagolt AAIM mindössze ötheti kezelés után jelentősen (átlagosan 4,2 százalékkal) csökkentette a plakkot. Egyetlen gyógyszer sem volt még képes ilyen gyorsan csökkenteni az ateroszklerózist.^[373]

Egy másik izgalmas, az ateroszklerózis visszafordítását célzó gyógyszer a Pfizer Torcetrapibja, jelenleg a harmadik tesztelési fázisban van.^[374] Ez a szer úgy növeli a HDL szintjét, hogy blokkol egy enzimet, ami egyébként lebontaná. A Pfizer rekordnak számító összeget, egymilliárd dollárt költ a gyógyszer tesztelésére, és azt tervezi, hogy kombinálni fogja rendkívül sikeres „sztatinjával” (koleszterincsökkentőjével), a Lipitorral.

A rák legyőzése. Jelenleg is sok módszerrel próbálják intenzíven legyőzni a rákot. Különösen ígéretesek azok a rákvakcinák, amelyek az immunrendszert stimulálják a rákos sejtek megtámadására. Ezeket a vakcinákat a rák megelőzésére lehet majd használni, első vonalbeli kezelésként, vagy az egyéb kezelések után, az utolsó rákos sejtek elpusztítására.^[375]

Az első dokumentált próbálkozások egy beteg immunreakciójának a kiváltására több mint száz évvel ezelőtt történtek, kevés sikerrel.^[376] A jelenlegi erőfeszítések a dendritikus sejteket, az immunrendszer őrszemeit célozzák meg, hogy beindítsák a normális immunreakciót. A rák sok fajtája azért fejlődhet ki, mert valahogy nem indítják be ezt a reakciót. A dendritikus sejteknek kulcsszerepük van, mert folyamatosan járják a testet, összegyűjtik az idegen peptideket és sejtörmeléket, és elszállítják azokat a nyirokcsomókhoz, melyek válaszul egy sereg T-sejtet termelnek, arra kihegyezve, hogy elpusztítsák a megjelölt peptideket.

Egyes kutatók a rákos sejtek génjeit változtatják meg, hogy azok vonzzák a T-sejteket, azt feltételezve, hogy a stimulált T-sejtek ezután felismerik majd a többi ráksejtet is, amivel találkoznak.^[377] Mások olyan vakcinákkal kísérleteznek, melyek antigéneknek, a rákos sejtek felszínén található egyedi fehérjéknek teszik ki a dendritikus sejteket. Az egyik kutatócsoport elektromos impulzusokkal olvasztotta egybe a rákos és immunsejteket, hogy létrehozson egy „egyedi vakcinát”.^[378] A hatékony vakcinák kifejlesztésének egyik gátja az, hogy egyelőre még sokat nem azonosítottunk azok közül a rákantigének közül, amelyekre szükségünk lenne a hatékony célzott vakcinák előállításához.^[379]

Az angiogenezis – az új erek létrehozásának – blokkolása egy másik stratégia. Ez a módszer gyógyszerekkel fogja vissza az érfejlődést, amire a kialakuló ráknak szüksége van ahhoz, hogy növekedésnek induljon. Az angiogenezis iránti érdeklődés 1997 óta élénkült meg, amikor a bostoni Dana Farber Rákközpont orvosai azt állapították meg, hogy az endosztatin, egy angiogenezis inhibitor többszöri alkalmazása a tumorok teljes visszahúzódását eredményezte.^[380] Ma már több antiangiogenikus gyógyszer is a klinikai tesztelés szakaszában tart, köztük az Avastin és az Atrasentan.^[381]

A rák és az öregedés szempontjából egyaránt kulcsfontosságúak a telomerszakaszok, a kromoszómák végén található, ismétlődő DNS-szekvenciák. Akárhányszor osztódik egy sejt, ez a szakasz eggyel rövidül. Amikor egy sejt annyiszor osztódott, hogy a telomer egészen elfogy, nem lesz képes tovább osztódni, és elpusztul. Ha meg tudnánk fordítani ezt a folyamatot, a sejtek örökké élhetnének. Szerencsére a legújabb kutatások megállapították, hogy ennek az eléréséhez egy egyszerű

enzimre (a telomerázra) van szükség.^[382] A trükk abban rejlik, hogy úgy adagoljuk a telomerázt, hogy ne okozzon rákot. A rákos sejteknek van egy génjük, amely telomerázt termel, s ez gyakorlatilag halhatatlanná teszi őket, a végtelenségig osztódhatnak. A rák elleni harchoz tehát az is hozzátartozik, hogy meggátoljuk a rákos sejteket a telomeráz termelésében. Ez ellentmondani látszik annak az elképzelésnek, hogy telomerázt juttassunk az egészséges sejtekbe az öregedés ellen, de a rákos sejtekben lévő telomeráz megtámadása egy kialakulófélben lévő daganatban nem feltétlenül zárja ki az egészséges sejtek célzott telomerázpótló terápiáját. Mindazonáltal a komplikációk elkerülése végett az ilyen terápiákat fel lehetne függeszteni a rákos megbetegedés kezelésének idejére.

Az öregedés visszafordítása

Logikus a feltételezés, hogy valamikor fajunk (és fajunk előfutárai) evolúciójának a kezdetén nem segítette volna a túlélést – sőt gátolta volna –, ha az egyének jóval tovább élnek, mint ami az utódaik felneveléséhez szükséges. A legújabb kutatások viszont az úgynevezett nagymama-hipotézist látszanak igazolni, mely ennek az ellenkezőjét állítja. Rachel Caspari, a Michigani Egyetem antropológusa, és San-Hee Lee, a Kaliforniai Egyetem munkatársa bizonyítékot talált arra, hogy az élő emberek közül nagyszülőkké (akik a primitív társadalmakban gyakran harmincévesek) válók aránya folyamatosan nőtt az elmúlt kétmillió évben, és a felső-paleolit korban (körülbelül harmincezer évvel ezelőtt) hirtelen megötszöröződött. Ezt a kutatást sokszor idézték annak a hipotézisnek az alátámasztására, hogy az emberi társadalmak fennmaradását a nagyanyák segítették, akik nemcsak a nagycsalád felneveléséből vették ki a részüket, hanem az idősek felhalmozott tudását is továbbadták. Ez lehet az adatok helyes értelmezése, de az élettartam általános növekedése szintén a várható élettartam mindmáig tartó növekedési trendjét tükrözi. Hasonlóképpen, csak kisszámú nagymamára (és néhány nagyapára) lett volna szükség az elmélet hívei által hangoztatott társadalmi hatások eléréséhez, tehát a hipotézis nem cáfolja kétséget kizáróan azt a következtetést, hogy a hosszú életért felelős gének nem öröklődtek tovább.

Az öregedés nem egyetlen folyamat, hanem számos változás együttese. Aubrey de Grey hét kulcsfontosságú öregedési folyamatot ír le, és mindegyik visszafordítására stratégiákat dolgozott ki.

DNS-mutációk.^[383] A nukleáris DNS (a sejtmag kromoszómaiban lévő DNS) mutációi általában sérült sejtet eredményeznek, amelyet gyorsan elpusztít a szervezet, vagy olyan sejtet, amely egyszerűen nem optimálisan működik. A minket leginkább érdeklő mutációfajta (mivel ez okozza a legtöbb halálesetet) az, amelyik a rendezett sejtosztódásra van hatással, és rákot okoz. Ez azt jelenti, hogy ha a fent ismertetett stratégiákkal meg tudjuk gyógyítani a rákot, a sejtmagban bekövetkező mutációk nagy részét is ártalmatlanná fogjuk tenni. De Grey megelőző stratégiát javasolt a rákkal szemben: génterápiával távolítaná el az összes sejtünkben azokat a géneket, amelyekre a ráknak szüksége van a telomerázszintje fenntartásához az osztódáskor. Ennek nyomán minden potenciális rákos tumor elsorvadna, mielőtt még akkorára nőne, hogy kárt okozzon. A gének törlését és elnyomását célzó stratégiák már ma is léteznek és gyorsan fejlődnek.

Mérgező sejtek. Néha előfordul, hogy a sejtek olyan állapotba kerülnek, amiben ugyan nem lesznek rákosak, de a szervezet számára mégis az a legjobb, ha nem maradnak életben. A sejtek előregedése egy példa erre, mint ahogy a túl sok zsírsejt is. Ezekben az esetekben egyszerűbb megölni ezeket a sejteket, mint megpróbálni visszaállítani őket egészséges állapotukba. Dolgoznak olyan

eljárások kifejlesztésén, amelyek „öngyilkos génekkel” célozzák meg az ilyen sejteket, illetve úgy jelölik meg őket, hogy az immunrendszer elpusztítsa őket.

Mitokondriális mutációk. Egy másik öregedési folyamat a mutációk felhalmozódása a mitokondriumok, a sejtek erőművei tizenhárom génjében.^[384] Ez a néhány gén létfontosságú a sejteink hatékony működése szempontjából, és magasabb köztük a mutációk aránya, mint a sejtmag génei közt. Amint elsajátítjuk a szomatikus génterápiát, több másolatot helyezhetünk el ezekből a génekből a sejtmagban, redundanciát (biztonsági másolatot) biztosítva ezeknek a létfontosságú genetikai információknak. A sejtben már eleve megvan az a mechanizmus, ami lehetővé teszi a sejtmag által kódolt fehérjék bevitelét a mitokondriumokba, tehát nem szükséges magukban a mitokondriumokban előállítani ezeket a fehérjéket. Tulajdonképpen a mitokondriumok működéséhez szükséges fehérjék többsége már kódolva van a nukleáris DNS-ben. A kutatóknak sejttenyészetekben már sikerült mitokondriális géneket áthelyezniük a sejtmagba.

Sejten belüli aggregátumok. Toxinok a sejteken belül és kívül is keletkeznek. De Grey bemutat olyan szomatikus génterápiás stratégiákat, melyek új gének bejuttatásával lebontják az általa „sejten belüli aggregátumoknak” nevezett dolgokat – a sejteken belül lévő toxinokat. Találtak olyan fehérjéket, amelyek gyakorlatilag bármilyen toxint képesek elpusztítani, olyan baktériumokban, amelyek a TNT-től a dioxinig bármilyen mérgező anyagot meg tudnak emészteni.

Több kutatócsoport is úgy próbálja felvenni a harcot a sejten kívüli toxikus anyagokkal, ideértve a hibás fehérjéket és az amyloid plakkot is (ami az Alzheimer-kórral és egyéb degeneratív betegségekkel jár együtt), hogy az alkotómolekulák ellen ható vakcinákat hoz létre.^[385] Noha ennek a stratégiának az eredményeként az immunrendszer sejtei megemésztik a toxikus anyagokat, ezután használhatjuk a fentebb bemutatott sejten belüli aggregátumok elleni harcban is.

Sejten kívüli aggregátumok. Az előrehaladott glikációs végtermékek (AGE-k) a hasznos molekulák nemkívánatos kereszteződéséből jönnek létre, a túl sok cukor mellékhatásaként. Ezek a keresztezések megzavarják a fehérjék normális működését, és kulcsfontosságú szerepet játszanak az öregedési folyamatban. Az ALT-711 nevű kísérleti gyógyszer (fenacil-dimetiltiazolium-klorid) képes az eredeti szövet roncsolása nélkül feloldani ezeket a kereszteződéseket.^[386] Más, ezzel a képességgel rendelkező molekulákat is azonosítottak.

Sejtvesztés és atrófia. A testünk szöveteinek megvannak az eszközei arra, hogy pótolják az elnyűtt sejteket, de ez a képesség csak néhány szervre korlátozódik. Például ahogy öregszünk, a szív nem képes megfelelő ütemben pótolni a sejteit, és ezt azzal ellensúlyozza, hogy a megmaradt sejteket rostanyag felhasználásával megnöveli. Emiatt idővel a szív veszít rugalmasságából és rezponzivitásából. Itt a saját sejteink terápiás klónozása az alapvető stratégia, ahogyan arról fentebb már szóltam.

Az állatkísérletek terén már gyorsan fejlődnek az öregedés fentebb ismertetett forrásai elleni küzdelem eszközei, és hamarosan megkezdődnek az emberi terápiák is. A genom-projektből nyert adatok arra utalnak, hogy az öregedési folyamatban mindössze néhány száz gén érintett. Ezeknek a géneknek a megváltoztatásával már most radikális élethossznövelést értek el egyszerűbb állatoknál. Például a *C. elegans* féreg inzulin- és szexuálhormon-szintjét szabályozó gének módosításával a kísérleti állatok élethossza a hatszorosára nőtt, ami átszámítva ötszáz éves életet jelentene az ember

esetében.^[387]

Van egy hibrid forgatókönyv, amely a bio- és a nanotechnológiát egyszerre alkalmazva veti fel a biológiai sejtek számítógépekké alakításának ötletét. Ezek a „feljavított intelligenciájú” sejtek ezután érzékelhetnék és elpusztíthatnák a rákos sejteket és a patogéneket, vagy akár vissza is növeszthetnének emberi testrészeket. Ron Weiss princetoni biokémikus különböző logikai funkciókkal ruházott fel sejteket, amelyek így képessé váltak alapvető számítások elvégzésére.^[388] Timothy Gardner a Bostoni Egyetemről kifejlesztett egy sejszintű logikai kapcsolót, ami újabb alapvető építőelem ahhoz, hogy a sejteket számítógépekké változtassák.^[389] Az MIT Media Lab kutatói vezeték nélküli kapcsolaton küldtek üzeneteket, köztük bonyolult utasítássorozatokat módosított sejtekben lévő számítógépeknek.^[390] Weiss rámutat, hogy „amint képesek vagyunk programozni a sejteket, nem korlátoz minket az, hogy mit tudnak maguktól a sejtek. Beprogramozhatjuk őket új dolgokra, új mintázatokra.”

Emberi klónozás: a klóntechnológia legkevésbé érdekes alkalmazása

Az élet gépezetének egyik legerőteljesebb alkalmazása az, amikor klónozás formájában a biológia saját szaporodási mechanizmusát állítjuk a szolgálatunkba. A klónozás kulcsfontosságú technológia lesz – nem a teljes emberek klónozása miatt, hanem az élet meghosszabbítása szempontjából, „terápiás klónozás” formájában. Ez a folyamat új szöveteket hoz létre „fiatal”, kibővített telomerű, javított DNS-ű sejtekből a beteg szövetek vagy szervek sebészi beavatkozás nélküli pótlására.

Minden felelősségteljes gondolkodó, magamat is közéjük értve, etikátlannak tartja az ember klónozását. Az én érveimnek azonban nem sok közük van az emberi élet teremtésének kényes problematikájához. Nem, az én érvem az, hogy a technológia ma még egyszerűen nem elég megbízható. A jelenlegi eljárás, melynek során a donor sejtmagját egy elektromos impulzussal kényszerítik a petesejtbe olvadásra, egyszerűen túl sok genetikai hibát okoz.^[391] Ez az oka annak, hogy a legtöbb magzat, amelyet ezzel a módszerrel hoznak létre, nem marad életben, és még a megmaradók is genetikai defektusoktól szenvednek. Dolly, a bárány elhízott felnőttkorára, és az eddig létrehozott klónozott állatok többségének előre nem látható egészségi problémái támadtak.^[392]

A tudósoknak számos ötletük van a klónozás tökéletesítésére, köztük alternatív módszerek a sejtmag bejuttatására a petesejtbe, a destruktív elektromos sokk nélkül, de amíg a technológia nem bizonyíthatóan biztonságos, addig nem lenne etikus ilyen komoly egészségügyi kockázattal emberi életet teremteni. Kétségtelen, hogy előbb-utóbb fognak embert klónozni, a szokásos okoktól hajtva, a hírértékétől kezdve a hasznosságáig. Ez egy módszer a halhatatlanság egyik igen gyenge változatának az elérésére. A fejlett állatokon bizonyíthatóan jól működő módszerek az emberre is alkalmazhatóak lesznek. Amint tökéletesítik az eljárás biztonságát garantáló eszközöket, az etikai gátak meggyengülnek, ha el nem is tűnnek teljesen.

A klónozás fontos technológia, de nem az emberek klónozása a legcélszerűbb felhasználása. Vegyük sorra először a leghasznosabb alkalmazási módokat, utána pedig visszatérünk a legvitatottabbra!

Miért fontos a klónozás? A klónozás legfontosabb felhasználási területe a hatékonyság javítása azzal, hogy közvetlenül szaporíthajtuk a kívánatos genetikai állománnyal rendelkező állatokat. Erre példa a transzgenikus embriók (idegen géneket tartalmazó embriók) szaporítása a gyógyszergyártás számára. Csak egy példa: az egyik ígéretes rákgyógyszer egy antiangiogenetikus szer, az aaATIII, amit

egy transzgenikus kecske teje hordoz.^[393]

A veszélyeztetett fajok megóvása és a kihaltak feltámasztása. Egy másik izgalmas alkalmazási terület a veszélyeztetett fajok klónozása. Ha lefagyasztjuk ezeknek a fajoknak néhány sejtjét, akkor soha nem fognak kihalni. Végül lehetséges lesz majd újra megteremteni a közelmúltban kihalt fajok egyedeit. A tudósok 2001-ben szintetizálták az akkor már hatvanöt éve kihalt tasmán tigris DNS-ét, abban a reményben, hogy így visszahozhatják a fajt az életbe.^[394] Ami a rég kihalt fajokat (például a dinoszauruszokat) illeti, nagyon kétlem, hogy találni fogunk teljesen ép DNS-t egyetlen megmaradt sejtben (ahogy azt a *Jurassic Park*ban csinálták). Ugyanakkor valószínű, hogy ha összefűzzük a különböző töredékekből származó információkat, végül képesek leszünk majd szintetizálni a szükséges DNS-t.

Terápiás klónozás. Talán a legértékesebb alkalmazási mód az ember saját szerveinek terápiás klónozása. A csíravonalsejtekből kiindulva (melyek részt vesznek az öröklődés láncolatában) a génmérnökök különféle sejttypusokba való differenciálódást tudnak beindítani. Mivel a differenciálódásra a magzatkor előtti fázisban kerül sor (még a beágyazódás előtt), a legtöbb etikus szerint ez az eljárás nem vet fel problémákat, bár a kérdés természetesen vitatott.^[395]

Szomatikus emberi sejtek újratervezése. A transzdifferentiálás még ígéretesebb eljárás, mivel teljes mértékben kikerüli a magzati őssejtek használata miatti vitát. A páciens saját DNS-éből hoz létre új szöveteket azáltal, hogy az egyik sejttypust (például a hámsejtet) átalakítja egy másikká (például hasnyálmirigy-szigetsejtté vagy szívsejtté).^[396] Amerikai és norvég tudósok a közelmúltban sikeresen átprogramoztak májsejteket hasnyálmirigysejteké. Egy másik kísérletsorozatban emberi hámsejteket alakítottak át úgy, hogy azok az immunrendszer sejtjeinek és az idegsejteknek számos tulajdonságával rendelkezzenek.^[397]

Gondolkodjunk el a kérdésen: mi a különbség a hámsejt és testünk bármelyik másik sejtje között? Végül is ugyanaz a DNS-ük. Mint fentebb megjegyeztem, a különbségeket a fehérje-jelzőfaktorokban találjuk, amelyek közé a rövid RNS-fragmentumok és peptidek is tartoznak, és ezeket most kezdjük megérteni.^[398] E faktorok módosításával befolyásolhatjuk a génexpressziót, és rávehetjük az egyik sejtet, hogy átváltozzon egy másikká.

Ennek a technológiának a tökéletesítése nemcsak egy érzékeny etikai és politikai vitát szüntetne meg, hanem tudományos szempontból is ideális megoldást kínálna. Ha valakinek hasnyálmirigy-szigetsejtre vagy veseszövetre – vagy akár egy egész új szívre – van szüksége, az autoimmun-reakciók elkerülése érdekében inkább akarná a saját DNS-ét, mint valaki másét. Emellett ez a módszer a páciens bőven rendelkezésre álló hámsejtjeit használja, nem pedig a ritka és drága őssejteket.

A transzdifferentiálás közvetlenül növeszt szervet az ember saját genetikai mintájára. S ami talán a legfontosabb, az új szerv telomerjei teljes fiatalkori hosszukban fognak pompázni, tehát az új szerv gyakorlatilag fiatal lesz.^[399] A felhalmozódott DNS-hibákat is kijavíthatjuk a megfelelő (azaz DNS-hibáktól mentes) hámsejtek kiválasztásával, mielőtt más sejteké transzdifferentiálnánk őket. Ezzel a módszerrel egy nyolcvanéves férfi megkaphatja ugyanazt a szívet, ami mondjuk huszonöt éves korában dobogott a mellkasában.

Az 1-es típusú cukorbetegség jelenlegi gyógymódjai erős kilökődésgátló gyógyszereket igényelnek, amelyeknek veszélyes mellékhatásai lehetnek.^[400] A szomatikus sejtek újratervezésével az 1-es típusú cukorbeteg képes lesz hasnyálmirigy-szigetsejteket létrehozni a saját sejtjeiből vagy a hámsejtjeiből

(transzdzifferenciálással), vagy a felnőtt össejtjeiből. A saját DNS-ét fogja használni, és egy szinte kimeríthetetlen sejtállományból fog meríteni, tehát nem lesz szükség kilökődésgátló gyógyszerekre. (De az 1-es típusú cukorbetegség teljes gyógyításához le kell győznünk a páciens autoimmun-rendellenességét is, mert amiatt pusztítja el a teste a szigetsejtjeit.)

Még izgalmasabb az a lehetőség, hogy sebészi beavatkozás nélkül cseréljük le a régi szerveket és szöveteket új, „fiatal” megfelelőikre. Ha klónozott, meghosszabbított telomerű, kijavított DNS-ű sejteket juttatunk a szervezetbe, akkor beépülnek a régi sejtek közé. Ha ezt a kezelést újra és újra megismételjük, a szóban forgó szervet végül túlnyomórészt fiatal sejtek fogják alkotni. Egyébként is rendszeresen lecseréljük a sejtjeinket, akkor miért ne cseréljük őket megfiatalított sejtekre a rövid telomerű hibásak helyett? Semmi sem indokolja, hogy miért ne ismételhettünk ezt a folyamatot a testünk összes szövetével és szervével, miért ne válhatnánk egyre fiatalabbakká.

Az éhezés felszámolása a világban. A klóntechnológia még az éhezésre is kínál megoldást: húst és egyéb fehérjeforrásokat gyárakban is elő lehet állítani, *állatok nélkül*, az állati izomszövet klónozásával. Az előnyei közé tartozna a rendkívül alacsony költség, a mai, nagyüzemi körülmények között termelt húsokban lévő főregirtó-szerek és hormonok hiánya, a nagymértékben csökkenő környezeti hatás (a nagyüzemi állattartáshoz képest), a jobb tápanyagprofil, és az állatok szenvedésének a megszűnése. Akárcsak a terápiás klónozás esetében, nem teljes állatokat klónoznánk, hanem csak a kívánt testrészeket vagy húst. Lényegében az összes hús – több millió tonna – ugyanattól az állattól származna.

Az éhezés megszüntetése mellett más előnyei is lennének ennek az eljárásnak. Az így előállított húsról vonatkozna a gyorsuló megtérülések törvénye – az információalapú technológiák ár-teljesítmény-arányának exponenciális javulása –, és így rendkívül olcsóvá válna. Noha az éhezést napjainkban kétségkívül súlyosbítják politikai problémák és konfliktusok is, a hús olyan olcsó lehetne, hogy teljesen megváltoztatná az élelmiszerek árát.

Az állatok nélküli hús eljövetele az állatok szenvedésének is végét vetne. A nagyüzemi állattenyésztés gazdasági megfontolásai nagyon kis hangsúlyt fektetnek az állatok kényelmére: úgy kezeli őket, mint fogaskerekeket egy gépezetben. A klóntechnológiával termelt hús minden más szempontból teljesen közönséges lenne, de nem egy idegrendszerrel rendelkező állatból származna, amit, mármint az idegrendszert, általában a szenvedés szükséges előfeltételének tartanak, legalábbis a biológiai állatoknál. Ugyanezzel a módszerrel olyan állati melléktermékeket is előállíthatnánk, mint a bőr és a prém. Óriási előny lenne, hogy megszűnne a nagyüzemi állattartás által okozott ökológiai és környezeti károsodás, illetve eltűnnének az olyan prionalapú betegségek, mint a kergemarhakór és emberi megfelelője, a Creutzfeldt–Jakob-szindróma.^[401]

Az emberi klónozás ismételt vizsgálata. Ezzel vissza is jutottunk az ember klónozásához. Úgy gondolom, amint tökéletesítik a technológiát, sem az etikusok által hangoztatott súlyos problémák, sem a lelkes támogatók által hangoztatott előnyök nem érvényesülnének. Mi van, ha megjelennek olyan genetikai ikrek, akik között akár egy-két nemzedéknyi korkülönbség van? A klónozás valószínűleg olyan lesz, mint a többi technológia, amelyeket egy rövid ideig viták öveztek, de aztán gyorsan elfogadást nyertek. A fizikai klónozás teljesen más, mint a szellemi, melynek során egy ember teljes személyiségét, emlékeit, képességeit és történetét letöltik egy másik, másik – valószínűleg erősebb – gondolkodó közegbe. A genetikai klónozás esetében nem jelent problémát a filozófiai identitás, mivel az ilyen klónok egyszerűen más emberek lesznek, még annál is másabbak, mint ma a

hagyományos ikrek.

Ha a maga teljességében átgondoljuk a klónozást, a sejttől az organizmusig, akkor az előnyei remekül érvényesülnek a biológiában és a számítástechnikában zajló többi forradalom előnyeivel együtt. Amint megértjük a genomot és a proteomot (a genom expresszióját a fehérjékben), mind az emberek, mind az állatok esetében, és amint új eszközöket fejlesztünk ki a genetikai információszerzésre, a klónozás lesz az állatok, a szervek és a sejtek replikálásának az eszköze. Ennek pedig komoly hatása lesz mind a mi egészségünkre és jólétünkre, mind az állatvilágban élő rokonainkéra.

NED LUDD: *Ha mindenki meg tudja változtatni a génjeit, akkor mindenki minden szempontból „tökéletes” akar majd lenni, tehát nem lesz sokféleség, és értelmét veszti a kiválóság.*

RAY: *Nem egészen. A gének nyilván fontosak, de a természetünk – a képességeink, a tudásunk, az emlékeink, a személyiségünk – csak tükrözi a génjeinkben lévő információt, miközben a testünk és az agyunk a tapasztalataink nyomán kialakul. Ez nyilvánvaló az egészségünk kapcsán is. Én személy szerint hajlamos vagyok a 2-es típusú diabéteszre, és több mint húsz évvel ezelőtt diagnosztizálták is nálam a betegséget. Ma még sincs semmi rá utaló jel, mert legyőztem a genetikai hajlamomat az életmódommal kapcsolatos, a táplálkozást, a testmozgást és a táplálékkiegészítőket érintő döntéseimmel. Ami az agyunkat illeti, mindannyiunknak mások az adottságaink, de a konkrét képességeink attól függnék, hogy mit tanultunk, gyakoroltunk és tapasztaltunk. A génjeink csak hajlamosítanak. Az agy fejlődésén láthatjuk, hogyan működik ez. A gének leírnak bizonyos szabályokat és korlátokat az idegsejtek közötti kapcsolatok mintázataira vonatkozóan, de maguk a kapcsolatok, amelyekkel felnőttként rendelkezünk, egy a tanulásunkon alapuló önszervező folyamat eredményei. A végeredményre – hogy kik vagyunk – mind a genetikailag öröklött, mind a tanult (tapasztalati) tényezők hatással vannak (angolul nature and nurture).*

Tehát amikor lehetőségünk adódik felnőttként megváltoztatni a génjeinket, ezzel nem tüntetjük el a korábbi gének addigi hatásait. A génterápiát megelőző tapasztalatokat ugyanis a terápia előtt meglévő gének dolgozták fel, ezért az ember jellemét és személyiségét továbbra is alapvetően az eredeti génjei, azok korábbi hatásai határozzák meg. Például ha valaki a zenei tehetség génjeit adja hozzá az agyához a génterápiával, attól még nem válik egyik pillanatról a másikra zenei géniusszá.

Ned: *Rendben, értem, hogy az újratervezett felnőttek nem tudnak teljesen elszakadni a korábbi génjeiktől, de a „tervezett csecsemőknek” már meglesznek az új génjei és idejük is lesz az expressziójukra.*

RAY: *A „csecsemőtervezés” forradalom nagyon lassú lesz; ebben az évszázadban nem lesz jelentős tényező. Más forradalmak el fogják homályosítani. Még tíz-húsz évig nem fog a rendelkezésünkre állni a csecsemők „tervezéséhez” szükséges technológia. Fokozatosan fog elterjedni, és a következő nemzedéknek is kell majd húsz év, hogy felnőjön. Ekkorra már a szingularitás küszöbénél leszünk, és a valódi forradalmat a nem biológiai intelligencia dominanciája fogja jelenteni. Ez sokkal messzebb mutat majd bármiféle előretervezett génnél. A tervezett csecsemők és az újratervezett felnőttek mint fogalmak lényege pusztán a biológiai információs folyamatok átprogramozása. De akkor is biológiáról van szó, annak a szigorú korlátaival.*

NED: *Valamiről megfelelkezel: biológiai lények vagyunk. Azt hiszem, a legtöbb ember egyetértene azzal, hogy a biológiai lét az emberi létezés kvintesszenciális tulajdonsága.*

RAY: *Ez ma kétségtelenül így van.*

NED: *És ha rajtam múlik, így is marad.*

RAY: *Nos, ha csak a magad nevében beszélsz, az részemről teljesen oké. De ha biológiai maradsz, és nem programozod át a génjeidet, akkor nem sokáig leszel már itt, hogy beleszólj a vitába.*

Nanotechnológia: az információ és a fizikai világ keresztmetszete

„A végtelenül kicsi szerepe végtelenül nagy.”

(Louis Pasteur)

„De nem félek feltenni azt a végső kérdést, hogy végül a távoli jövőben sikerülhet-e kedvünkre elrendezni az atomokat is; magukat az atomokat!”

(Richard Feynman)

„A nanotechnológiában ott rejlik a lehetőség az emberi teljesítmény megnövelésére, az anyagok, a víz, az energia és az élelem fenntartható fejlesztésére, az ismeretlen baktériumok és vírusok elleni védelemre, és akár arra is, hogy csökkentsük a háborúskodás okát [az egyetemes bőség megteremtésével].”

(A Nemzeti Tudományos Alap nanotechnológiai jelentése)

A nanotechnológia olyan eszköztárat ígér, amivel molekuláris darabról molekuláris darabra újjáépíthetjük a fizikai világot, beleértve a testünket és az agyunkat is. A technológia kulcselemeit a gyorsuló megtérülések törvényének megfelelően sikerül zsugorítanunk, exponenciális ütemben, évtizedenként nagyjából minden lineáris méretet a negyedére csökkentve^[402]. Ilyen ütemben a legtöbb elektronikus és számos mechanikus technológia kulcselemei a nanotechnológia határain belül lesznek (az általános meghatározások szerint a száz nanométer alatti méretek tartoznak ide) a 2020-as évekre. (Az elektronika már átlépte ezt a határt, bár egyelőre a háromdimenziós struktúrákra ez még nem igaz, és a technológia nem önösszeállító). Mindeközben, főképp az elmúlt jó néhány év során gyors ütemű fejlődés ment végbe az eljövendő nanotechnológiás kor konceptuális kereteinek és tervezési ötleteinek kidolgozásában is.

Bármilyen fontos lesz is a fent ismertetett biotechnológiai forradalom, a módszerek kiérlelése után szembesülnie kell a biológia saját korlátaival. Bár a biológiai rendszerek figyelemre méltóan okosak, arra a felfedezésre jutottunk, hogy drámaian szuboptimálisak. Említettem már, milyen szélsőségesen lassú az agy kommunikációja, és mint arra a későbbiekben még kitérek, a vörösvértetek pótlása akár több ezerszer is hatékonyabb lehet, mint biológiai megfelelőjük volt^[403]. A biológia sosem lesz képes mindarra, amit az emberiség a biológiai működési elvek teljes megértése után előállíthat.

A nanotechnológiai forradalom viszont végleg képessé tesz minket arra, hogy molekuláról molekulára tervezzük át, építsük újra a testünket, az agyunkat és a minket körbevevő világot egyaránt.^[404] Ez a két nagy forradalom nagyrészt átfedi egymást, de a nanotechnológia teljes megvalósulása nagyjából egy évtizeddel van lemaradva a biotechnológiai forradalom mögött.

A nanotechnológia konceptuális születését a legtöbben Richard Feynman meghatározó, 1959-es beszédéhez kötik. A „Bőven van hely legalul” (*There’s Plenty of Room at the Bottom*) az atomi szintű gépek elkerülhetetlen létrejöttét és átfogó jelentőségű hatását írja le.

„Amennyire én látom, a fizika törvényei nem mondanak ellen az atomi szintű manipulációnak. Elméletben legalábbis lehetséges... hogy egy fizikus szintetikusan létrehozzon bármely, vegyészek által leírt anyagot... Hogyan? Tegyük csak oda az atomokat, ahová a vegyész mondja, és építsük meg az anyagot! A kémia és a biológia problémáin sokat segít, ha odáig fejlődünk, hogy lássuk, mit is csinálunk, és hogy atomi szinten dolgozhassunk – és úgy vélem, ez a fejlődés elkerülhetetlen útja^[405].”

A nanotechnológia egy még korábbi konceptuális alapját az információelmélet-kutató Neumann János fektette le még az ötvenes évek elején, amikor megalkotta az egyetemes számítógéppel kombinált egyetemes konstruktoron alapuló, önsokszorosító rendszer egyik modelljét^[406]. A modell szerint a számítógép futtatta program utasítja a konstruktort, amely ennek hatására másolatot készít a számítógépről (beleértve az önsokszorosító programot is) és a konstruktorról egyaránt. Ezen a szinten Neumann leírása igen absztrakt – a számítógép és a konstruktor egyaránt sokféleképp és számos anyagból elkészíthető, de lehet akár elméleti matematikai képződmény is. Ám Neumann egy lépéssel tovább vitte az elméletet, és a felvetésben egy „kinematikus konstruktor” szerepel, egy robot, amely legalább egy manipulátorral (karral) bír és „alkatrészek tengeréből” építi fel tulajdon másolatát^[407].

Eric Drexlerre maradt, hogy megteremtse a nanotechnológia modern tudományágát a nyolcvanas évek közepén írt, meghatározó jelentőségű PhD-disszertációjának vázlatával, melyben gyakorlatilag egyesítette ezt a két, önmagában is érdekes felvetést. Drexler leírta Neumann kinematikus konstruktorát, és alkatrészeiként – Feynman beszédére utalva – atomokat és molekulákat adott meg. Drexler elképzelése több tudományos terület határán is átlépett, és olyan széles ívű volt, hogy tulajdon mentoromat, Marvin Minskyt leszámítva senki sem volt elég merész ahhoz, hogy témavezetőként támogassa a dolgozat elkészülését. Drexler disszertációja (amelyből az 1986-os *Engines of Creation – A teremtés motorjai* – című könyve született, és amelyet technikai szempontból 1992-es *Nanosystems – Nanorendszerek* – című könyvében fejtett ki) lefektette a nanotechnológia alapjait, amelyekre a mai napig építkezünk.^[408]

Drexler „molekuláris összeállítója” (*assemblere*) szinte bármit képes lesz létrehozni. Nemegyszer „univerzális összeállítóként” hivatkoznak rá, de Drexler és a nanotechnológia elméletével foglalkozó többi kutató nem használja az „univerzális” kifejezést, mert egy ilyen rendszer termékeire szükségszerűen vonatkoznak a fizika és kémia törvényei, így hát csak atomi szinten stabil szerkezetek képzelhetők el. Továbbá minden adott összeállítót korlátozna, hogy csak a saját, rendelkezésére álló alkatrészeiből építkezhet, bár elvben lehetséges akár egyedi atomok felhasználása is. Mindezzel együtt egy ilyen összeállító nagyjából bármilyen fizikai eszközt elő tudna állítani, amit akarunk, beleértve hatékony számítógépeket és további összeállítókra vonatkozó alrendszereket is.

Bár Drexler nem vázolt fel részletes tervet az összeállítóról – a mai napig nem készült el egy ilyen terv teljes specifikációja sem – a disszertációja kimerítően felsorolta a molekuláris összeállító minden alapvető komponensének megvalósíthatóságára vonatkozó érveket. A főbb komponensek:

- A számítógép: biztosítja az összeállítási folyamat irányításához szükséges intelligenciát. Miképp a gépezet összes többi alrendszerének, a számítógépnek is kicsinek és egyszerűnek kell lennie. Mint azt a harmadik fejezetben már említettem, Drexler igen elgondolkoztató

konceptuális leírást adott a tranzisztorkapuk helyett molekuláris „záarakkal” ellátott mechanikus számítógépről. Minden egyes zárnak csak tizenhat nanométernyi helyre lenne szüksége, és másodpercenként tízmilliárd kapcsolásra volnának képesek. Ez a felvetés minden mai napig ismert elektronikus technológiánál sokkal versenyképesebb, bár úgy tűnik, a háromdimenziós konfigurációban elhelyezett szén nanocsövekből felépülő elektronikus számítógépek még ennél is nagyobb számításiteljesítmény-sűrűséggel bírhatnak (számítás per szekundum per grammban mérve).^[409]

- *Az utasítás-architektúra:* Drexler és kollégája, Ralph Merkle SIMD-architektúrát (single instruction multiple data; *egy utasítás – több adat*) javasoltak, melyben egyetlen adattároló egyszerre rögzíti és továbbítja az utasításokat több billió molekuláris méretű összeállítónak (melyek mindegyike rendelkezik saját, egyszerű számítógéppel). A SIMD-architektúra egyes korlátait már boncolgattam a harmadik fejezet során, de ez az elképzelés (melyet könnyebb megvalósítani, mint a rugalmasabb több utasítás – több adat megközelítést) bőven elég egy egyetemes nanotechnológiai összeállító számítógép esetében. Ebben a megközelítésben az egyes összeállítóknak nem kellene a céltermék létrehozatalához szükséges teljes programot tárolniuk. Az adatokat a központból sugárzó architektúra egy kulcsfontosságú biztonsági problémát is megold: az önsokszorosítási folyamatot le lehet állítani, ha irányíthatatlanná válna, elég csak a sokszorosító utasítások központi forrását kikapcsolni. De mint arra Drexler is felhívja a figyelmet, a nanoméretű összeállítónak nem kell feltétlenül önsokszorosítónak lennie.^[410] Az önsokszorosításban rejlő veszélyeket figyelembe véve a Foresight Intézet (az Eric Drexler és Christine Peterson alakította műhely) javasolta etikai standardokban szerepel a korlátozatlan önsokszorosítás tiltása, különösen természetes környezetben.

Amint arra kitérek még a nyolcadik fejezetben, ennek a megközelítésnek az ésszerűség határain belül elegendőnek kellene lennie a nem kívánt veszélyekkel szemben, bár egy elszánt és nagy tudású ellenfél képes lehet megkerülni.

- *Utasításátvitel:* az utasítások átvitele a központi adattárolóból a megannyi összeállító mindegyikéhez elektronikus számítógép esetén elektronikusan, mechanikus számítógép esetében pedig mechanikus rezgéssel történne.

- *Az építőrobot:* a konstruktor egyszerű molekuláris robot lenne, egyetlen karral; hasonló Neumann kinematikus konstruktorához, csak éppen igen parányi. Már léteznek molekuláris méretű kísérleti rendszerek, amelyek motorként és robotlábként funkcionálhatnak, mint arról az alábbiakban még bővebben írok majd.

- *A robotkar feje:* Drexler *Nanorendszerek* című könyvében számos megvalósítható kémiai elképzelés szerepelt arra nézve, hogy a robotkar hegye miként lehet képes megragadni (a megfelelő atomi kölcsönhatások segítségével) a molekulatöredékeket, vagy akár egyetlen atomot, hogy aztán a megfelelő helyen letegye. A mesterséges gyémántok létrehozásában használt gözfázisú leválasztási folyamatban kémiai reakciók segítségével kerülnek az atomok a kívánt helyükre. Ez egy sok milliárd atom felhasználásával történő, kaotikus folyamat, de a Robert Freitas és Ralph Merkle nevéhez fűződő konceptuális felvetések olyan robotkarhegyeket vizsgálnak, melyek képesek felvenni egy atomot a kiinduló anyagból, és a molekuláris gép építése során a kívánt helyre teszik őket. E szerint a felvetés szerint a parányi gépek tehát gyémántszerű anyagból épülnének fel. Amellett, hogy igen erősek lennének, az anyagot precízen megtervezett tökéletlenségekkel ellátva elektronikus alkatrészeket, például tranzistorokat hozhatnának létre. A szimulációk szerint az efféle

molekuláris méretű fogaskerek, emelők, motorok és más mechanikai rendszerek működőképesek lennének.^[411] A figyelem mostanában a szén nanocsövekre összpontosul: ezek a háromdimenziós, felcsavart hatszöges síkrácsban elhelyezkedő szénatomokból álló struktúrák mechanikai és elektronikai funkciókat is képesek molekuláris szinten betölteni. Az alábbiakban felsorolok pár példát a már megépített molekuláris méretű gépekre.

- Az összeállító *belső környezetének* képesnek kell lennie megakadályozni, hogy a környezeti szennyezés hatással legyen az érzékeny összeállítási folyamatra. Drexler felvetése szerint az ideális egy vákuumközeli állapot fenntartása lenne, és az összeállítót ugyanabból a gyémántszerű anyagból álló fal venné körbe, melynek az előállítására maga az összeállító is képes volna.
- Az összeállítási folyamathoz szükséges *energia* elektromosságból vagy vegyi folyamatokból is származhat. Drexler olyan kémiai folyamatot javasolt, melynek üzemanyagát beépítik a kiinduló építőanyagba. A későbbi javaslatokban hidrogént és oxigént, vagy glükózt és hidrogént tartalmazó nanotervezett üzemanyagcellák szerepelnek, vagy ultrahang frekvenciájú hangrezgések akusztikus energiája.^[412]

Bár számos konfigurációt javasoltak, az összeállítót jellemzően kisméretű szerkezetként írják le, amely nagyjából bármilyen fizikailag lehetséges terméket képes létrehozni, amelynek rendelkezésre áll a szoftveres tervrajza – ruhát éppúgy, mint számítógépet, művészeti alkotást éppúgy, mint főtt ételt.^[413] Nagyobb termékek, például bútorok vagy autók modulárisan állíthatók össze, vagy nagyobb, gépeket alkotó összeállítókból hozhatók létre. Különösen fontos az a tény, hogy egy összeállító képes elkészíteni a tulajdon másolatát, kivéve, ha a tervezése ezt kifejezetten tiltja valamiért (az esetlegesen veszedelmes önszokszorosítást elkerülendő). Tetszőleges fizikai termékből egy újabb példány előállítása elenyésző költséggel járna – gyakorlatilag anyagáron. Drexler becslései szerint a molekuláris gyártási folyamatok költsége kilónként tíz és ötven cent között lenne, attól függetlenül, hogy a létrehozott termék ruha, erősen párhuzamos szuperszámítógép, vagy újabb gyártórendszerek.^[414]

A valódi költség természetesen az egyes terméktípusokat leíró információ értéke lenne – azaz az összeállítási folyamatot irányító szoftver. Másképp mondva, a világon mindennek, beleértve a fizikai tárgyakat is, teljességgel az információn alapulna az értéke. A helyzet már ma sem tér el ettől olyan sokban, hiszen a termékek információtartalma meredeken növekszik, és fokozatosan megközelíti összértékük száz százalékát.

A molekuláris gyártórendszereket irányító szoftver tervezése maga is szinte teljességgel automatizálva lenne, akárcsak napjainkban a mikrochipek terve. A chiptervezők nem határozzák meg a milliárdnyi vezető és egyéb alkatrész mindegyikének pontos helyét, inkább csak a konkrét funkciókat és tulajdonságokat határozzák meg. A számítógépes tervezőrendszerek (*computer-aided design, CAD*) fordítják át az információt a chip végső tervezetébe. A CAD-rendszerek éppígy képesek lennének arra is, hogy részletes specifikációk alapján a molekuláris gyártást irányító szoftvert hozzanak létre. Ebben benne volna az is, hogy egy háromdimenziós rendszer képes letapogatni egy termék háromdimenziós felépítését, és ezt követően megírni a szoftvert, amely reprodukálja a termék lényeges jellemzőit.

Működés közben a központosított adattároló szimultán küldené ki az utasításokat az összeállítót alkotó több billió (egybe becslések szerint akár 10^{18}) robotnak, melyek mindegyike egyszerre kapná meg az instrukciókat. Az összeállító úgy hozná létre a molekuláris robotokat, hogy először legyárt belőlük egy kisebb mennyiséget, aztán ezekkel a robotokkal hozat létre további robotokat, míg csak el nem érte a kívánt mennyiséget. Mindegyik robotban lenne egy helyi adattároló, melyen elfér az adott pillanatban építendő struktúra tervrajza. Ez a tároló korlátozná a központosított adattárból küldött

globális üzenetek érvényességét, szükség esetén bizonyos utasításokat blokkolna, illetve helyi paraméterekkel töltene fel. Így az egyes molekuláris robotok építette alkatrész testre szabott maradna annak ellenére, hogy mindegyik összeállító ugyanazt az utasítássorozatot kapja meg. A folyamat a biológiai rendszerek génkifejezésével lenne analóg. Bár minden egyes sejtben ott van minden egyes gén, csak az adott sejttípus számára fontos gének kerülnek kifejezésre. Az alapanyagból minden robot pontosan a szükséges nyersanyagokat és üzemanyagot – szénatomokat és megfelelő molekulatöredékeket – használná fel.

A biológiai összeállító

„A természet megmutatta, hogy a molekulák funkcionálhatnak gépekként, hiszen minden élő szervezet ilyen gépezetként működik. Az enzimek a többi molekulát összetartó kötéseket létrehozó, felbontó és átrendező molekuláris gépek. Az izmokat a rostokat mozgató molekuláris gépezetek hajtják. A DNS adattároló rendszerként működik, digitális utasításokat sugároz a molekuláris gépeknek, a fehérjemolekulákat létrehozó riboszómáknak. És ezekből a fehérjemolekulákból épül fel aztán a molekuláris gépezet túlnyomó része.”

(Eric Drexler)

A molekuláris összeállító megvalósíthatóságára maga az élet a végső bizonyíték. Minél alaposabban átlátjuk az életfolyamatok információs alapját, annál több olyan ötletet fedezünk fel, amik az általános molekuláris összeállító tervezési követelményeire is alkalmazhatóak. Példának okáért felmerült már, hogy glükózt és ATP-t használjunk molekuláris energiaforrásként, hasonlóan a biológiai sejtekhez.

Nézzük csak meg, a biológia miként oldja meg a Drexler-összeállító tervének kihívásait! A riboszóma egyszerre képviseli a számítógépet és az építő robotot. Az élet nem központosított adattárolót használ, hanem minden egyes sejtet ellát a teljes kóddal. Az a képesség, hogy a nanotervezett robot helyi adattárát az összeállító kód egy kis részére korlátozhatjuk (az adatsugárzó architektúra segítségével), különösen, ha önsokszorosításról van szó, egyike a nanotechnológia azon létfontosságú tulajdonságainak, amelyeknek köszönhetően biztonságosabbra alkothatjuk meg a biológiánál is.

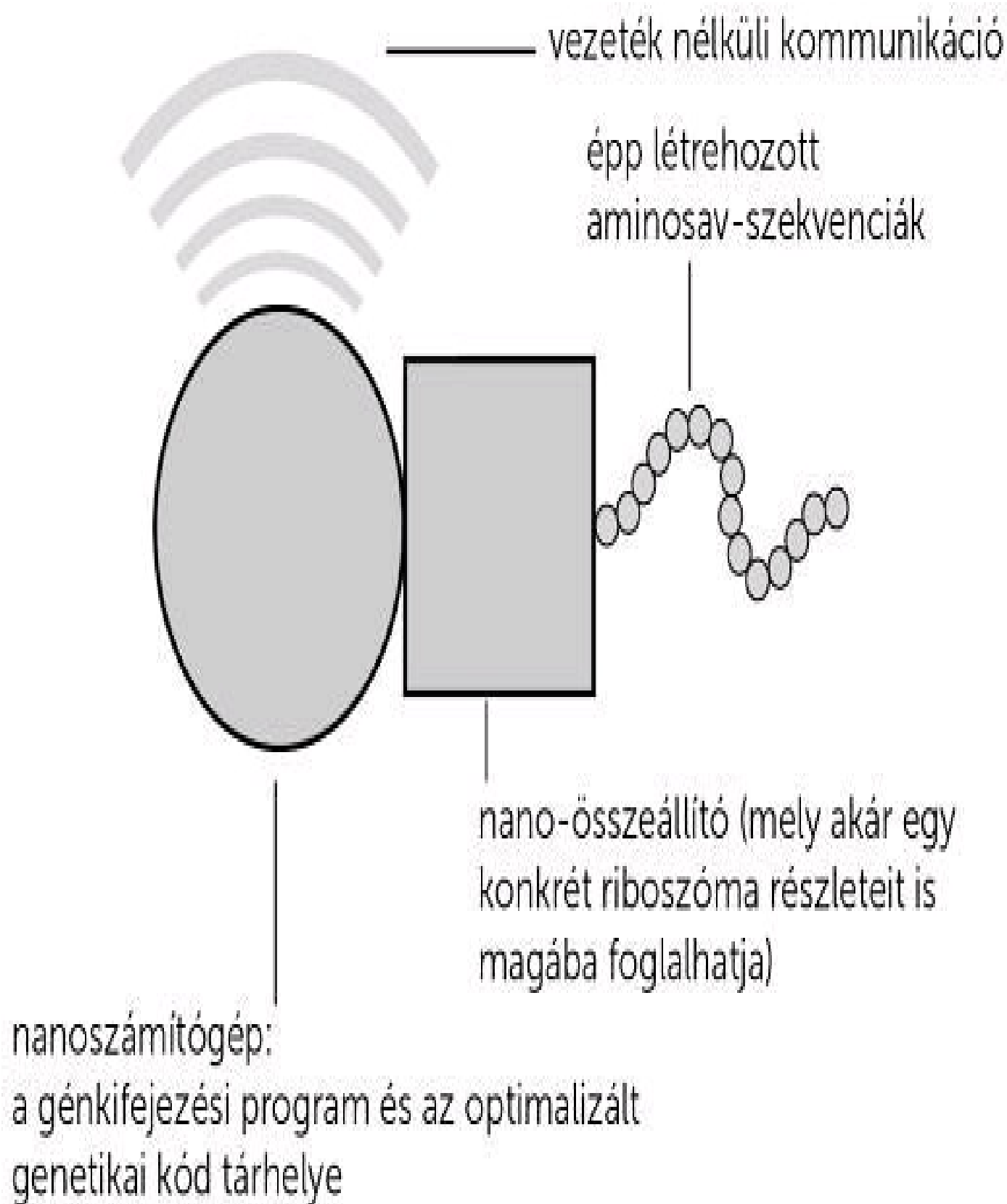
Az élet adattárolói természetesen a DNS-szálak, a kromoszómákon elhelyezkedő egyes génekkel. Az utasítások kitakarását (az adott sejttípus számára nem szükséges gének blokkolását) a rövid RNS-molekulák és a génkifejezést vezérlő peptidek irányítják. A riboszóma működéséhez szükséges belső környezet a sejt belsejében lévő, meghatározott vegyi környezet, melynek része egy bizonyos kémhatású közeg (az emberi sejtekben 7-es pH) és egyéb vegyi egyensúlyok. A sejtfal feladata megóvni ezt a belső környezetet a zavaró külső hatásoktól.

A sejtmag továbbfejlesztése nanoszámtógéppel és nanobottal. Íme egy konceptuálisan egyszerű javaslat, mely a prionok (önsokszorosító, patogén fehérjék) kivételével minden patogént legyőzne: a 2020-as évekkel teljességgel beérő nanotechnológiai fejlesztések segítségével képesek lehetünk rá, hogy kicseréljük a biológia genetikai információtároló rendszerét a sejtmagban egy nanotervezett rendszerre, amely karbantartaná a genetikai kódot, illetve szimulálná az RNS, a riboszómák és a biológiai összeállító számítógép más elemeinek működését. Egy nanoszámtógép

tárolná a genetikai kódot és alkalmazná a génkifejezési algoritmusokat. Ezután egy nanobot létrehozná a kifejezésre kerülő gének aminosav-szekvenciáit.

Egy efféle mechanizmus jelentős előnyökkel járna. Kiküszöbölhetnénk a DNS másolási hibáinak felhalmozódását, az öregedési folyamat egyik legfőbb forrását. Olyan DNS-módosításokat vezethetnénk be, melyek gyakorlatilag újraprogramoznák a génjeinket (bár ezt már jóval korábban képesek leszünk elérni a génterápiás technológiák segítségével). Képesek lennénk továbbá legyőzni a biológiai patogéneket (a baktériumokat, vírusokat és rákos sejteket), hiszen blokkolni tudnánk a genetikai információ nem kívánt sokszorosítását.

Nanobotalapú sejtmag



Egy ilyen nanotervezett rendszerrel a javasolt adatsugárzó architektúra képessé tenné minket arra, hogy leállítsuk a nem kívánt sokszorosítást, azaz le tudnánk győzni a rákot, az autoimmun-reakciókat, és egyéb kóros folyamatokat. Bár a legtöbb kóros folyamatot addigra már le fogják győzni az előző fejezetekben taglalt biotechnológiai módszerekkel, az élet számítógépének nanotechnológiás újratervezésével eltávolíthatunk minden fennmaradt akadályt, és olyan tartós, rugalmas életformát hozhatunk létre, mely messze meghaladja a biológiában rejlő lehetőségeket.

A robotkarhegy a riboszómák képességeit alkalmazva, enzimszerű reakciók segítségével választaná le az egyes, specifikus tRNS-hez kötött aminosavakat, és peptidkötéssel kapcsolná őket a szomszédos aminosavakhoz. A rendszer így a riboszómák szakaszait is hasznosíthatná, mivel ez a biológiai gépezet képes lenne létrehozni a megfelelő aminosavsálakat.

A molekuláris gyártás célja azonban nem csak a biológia molekuláris konstrukciós képességeinek leutánzása. A biológiai rendszerek korlátozottak, csak fehérjéből építkeznek, és ez gyorsaság és erő szempontjából is súlyos megkötöttség. Bár a biológiai fehérjék háromdimenziósak, a biológia a vegyületek egydimenziós aminosavakból hajtogatható osztályára korlátozódik. A gyémánt fogaskerekekből és rotorokból épült nanobotok több ezerszer gyorsabbak és erősebbek lehetnek a biológiai sejteknél.

Az összehasonlítás a számítások terén még drámaibb eredményekkel jár: egy nanocsőalapú számítás kapcsolósebessége több milliószor gyorsabb lehet, mint az emlősök idegsejtközi szinapszisaiban megvalósuló meglehetősen lassú elektrokémiai kapcsolatok.

A fentebb leírt gyémántszerű anyagból felépülő összeállító koncepciója konzisztens alapanyag(építő- és üzemanyag)-bevittel dolgozik, és ez is a számos védelmi mechanizmus egyike, amely a robotok irányítatlan, molekuláris szintű sokszorosítása ellen védene a külvilágban. A biológia sokszorosító robotja, a riboszóma éppúgy gondosan ellenőrzött forrás- és üzemanyagkészlettel dolgozik, melyeket az emésztőrendszerből nyer. Ahogy a nanoalapú sokszorosítók egyre összetettebbek, és egyre jobban ki tudják vonni a szénatomokat és a szénalapú molekulákat a kevésbé jól irányított forrásanyagokból, és képessé válnak az ellenőrzött laborkörnyezeten kívül is működni, igen nagy veszélyt jelenthetnek a világ számára. Ez különösen azért igaz, mert a nanoalapú sokszorosítók nagyságrendekkel gyorsabbak és erősebbek bármely biológiai rendszernél. Ez a képesség természetesen számos vita alapját képezi, erről a 8. fejezetben bővebben értekezek.

A Drexler-féle *Nanorendszerek* megjelenése óta eltelt évtizedben Drexler konceptuális terveinek minden aspektusát további tervjavaslatok erősítették meg.^[415] A Bostoni Főiskola kémiaprofesszora, T. Ross Kelly beszámolt egy hetvennyolc atomból készült, vegyi meghajtású nanomotor megépítéséről.^[416] Carlo Montemagno vezetésével egy biomolekuláris kutatócsoport létrehozott egy ATP-üzemanyagú nanomotort.^[417] Egy másik molekuláris méretű, napenergiával működő motort Ben Feringa hozott létre ötvennyolc atomból a Groningeni Egyetemen, Hollandiában.^[418] Hasonló előrelépések történtek a molekuláris méretű mechanikus alkatrészek, fogaskerekek, rotorok és emelők előállításában is. A kémiai és akusztikus energiák felhasználását bemutató rendszerek (Drexler eredeti leírásának megfelelően) szintén megtervezésre, szimulálásra és megépítésre kerültek. Jelentős haladás történt a különféle elektronikai alkatrésztípusok molekuláris méretű szerkezetekből való fejlesztésében is, különösen a Richard Smalley úttörő fejlesztései, a szén nanocsövek területén.

A nanocsövek igen sokoldalú szerkezeti összetevőnek bizonyultak. A Lawrence Berkeley Nemzeti Laboratórium tudósai nemrégiben nanocsövekből készült futószalagot mutattak be.^[419] A nanoméretű futószalag segítségével parányi indiumrészecskéket szállítottak egyik helyről a másikra, bár e technika

átalakításával akár molekulaméretű tárgyak is mozgathatók. A készülék elektromos áramát irányítva befolyásolható a mozgás iránya és sebessége. „Olyan, mintha gombnyomással tudnánk irányítani a nanoméreten zajló tömegszállítást” – mondta Chris Regan, a tervezők egyike. „Az a képesség, hogy gyorsan és pontosan el tudjuk juttatni a molekulaméretű építőanyagokat, kulcsfontosságú a molekuláris összeállítók felépítésében.”

A General Dynamics által a NASA számára elvégzett kutatás igazolta a nanoméretű, önsokszorosító gépek megvalósíthatóságát.^[420] A kutatók számítógépes szimulációk segítségével bebizonyították, hogy a kinematikus sejtautomata névre hallgató, újrakonfigurálható molekuláris modulokból épített, molekuláris pontossággal felépülő robotok képesek önmaguk sokszorosítására. Ez a terv is adatsugárzó architektúrát használt, ami az önsokszorosítás ezen biztonságosabb módjának megvalósíthatóságát is megmutatta.

A DNS legalább olyan sokoldalúnak bizonyul a molekuláris szerkezetek építésében, mint a nanocsövek. A DNS azon tulajdonsága, hogy könnyen összekapcsolódik saját magával, igen hasznos szerkezeti elem. A jövő tervezői talán képesek lesznek felhasználni ezt a tulajdonságot, akárcsak az információátvitelt. A nanocsövek és a DNS egyaránt kiemelkedően jó információátviteli és logikai irányítóképességekkel bírnak, és erős, háromdimenziós szerkezeteket képesek építeni.

A müncheni Ludwig Maximilian Egyetem egy kutatócsoportja olyan „DNS-kezet” épített, amely képes kiválasztani egy adott fehérjét a többi közül, kötést létrehozni vele, majd parancsra eloldani.^[421] Shiping Liao és Nadrian Seeman legújabb nanotechnológiai kutatásai fontos lépéseket tettek egy a riboszómához hasonló DNS-összeállító mechanizmus létrehozásában.^[422] A molekuláris tárgyak irányított megragadása és elengedése újabb olyan tulajdonság, ami igen fontos a molekuláris nanotechnológiai összeállítás során.

A Scripps Kutatóintézet tudósai demonstrálták, hogy képesek DNS-blokkokat létrehozni. Több példányban elkészítettek egy 1669 nukleotidból álló DNS-szálat, bennük gondosan meghatározott helyzetű, egymást kiegészítő régiókkal.^[423] A szálak spontán merev oktaéderekké álltak össze, melyek háromdimenziós szerkezetek építőelemeiként szolgálhatnak. A folyamat egy másik lehetséges alkalmazásában az oktaéderek fehérjeszállító kapszulaként működnének, ezt az elképzelést Gerald F. Joyce, a Scripps egyik kutatója „fordított vírusként” írta le. A vírusok – melyek szintén önösszeállító szerkezetek – rendszerint fehérjéből álló külső héjjal rendelkeznek, a DNS (vagy RNS) ezen a héjon belül helyezkedik el. „Az általunk megvalósított új módszerrel – hívja fel rá Joyce a figyelmet – elméletileg megoldható, hogy a DNS legyen kívül, és a fehérjék belül”.

A DNS-ből épített nanoméretű szerkezetek különösen lenyűgöző példája az a parányi kétlábú robot, amely mindössze tíz nanométer hosszú lábakon jár.^[424] Mind a lábakat, mind a pályát DNS-ből építették – újfent azért erre esett a választás, mert a molekula képes irányított módon kémiai kötések kialakítani, illetve felbontani. A nanorobot a New York-i Egyetem két kutatója, Nadrian Seeman és William Sherman projektje, és úgy mozog, hogy eloldja a lábát a pályáról, előrelép, majd visszaköti a lábát a pályára. Ez a projekt is hatásosan demonstrálja, hogy a nanoméretű gépezetek képesek precíz manőverek elvégzésére.

A nanobotok tervezésének alternatív módszere az, ha a természettől tanulunk. Michael Simpson, az Oak Ridge Nemzeti Laboratórium nanotechnológusa azt a lehetőséget vizsgálja, hogy baktériumokat használjunk fel „készen kapott gépezetként”. A baktériumok természetes nanobot méretű objektumok, és képesek a mozgásra, az úszásra és a folyadékok pumpálására.^[425] Linda Turner, a harvardi Rowland Intézet kutatója a baktériumok különféle feladatok elvégzésére alkalmas vékony karjaira (az ún. fimbriákra) fókuszál: a baktériumok a karok segítségével szállítanak más nanoméretű

tárgyakat, és keverik össze a folyadékokat. Egy másik megközelítésben a baktériumoknak csak részeit használnák fel. A Washingtoni Egyetem Viola Vogel vezette kutatócsoportja olyan rendszert épített fel az *E. coli* baktériumnak csak a csillóit felhasználva, amely képes volt szétválogatni különböző méretű nanogyöngyöket. Minthogy a baktériumok eleve számos eltérő funkciót ellátni képes nanoméretű rendszerek, ezen kutatás végső célja nem más, mint a baktériumok működésének visszafejtése, hogy az onnan ellesett tervezési elveket felhasználhassuk a saját nanobotterveinkben is.

A vastag és a ragadós ujjak

Miközben a jövő nanotechnológiai rendszereinek minden oldala igen gyors ütemben fejlődik, még mindig nem találtak igazán komoly hibát Drexler nano-összeállító koncepciójában. 2001-ben nagy publicitást kapott ugyan a Nobel-díjas Richard Smalley a *Scientific American*-ben megjelent ellenvetése, de az Drexler javaslatainak egy torz leírásán alapult^[426], és nem foglalkozott az azt megelőző évtized igen kiterjedt munkásságával sem. A szén nanocsövek úttörőjeként Smalley roppant lelkesen fordult a nanotechnológia számos alkalmazása felé, úgy írta, „a válasz a nanotechnológiában rejlik, már amennyire választ lehet adni az energia, egészségügy, kommunikáció, közlekedés, élelem és víz terén felmerülő legtöbb súlyos anyagi szükségletünkre”, de továbbra is szkeptikus a molekuláris nanotechnológiai összeállítók kapcsán.

Smalley leírása szerint Drexler összeállítójának öt-tíz „ujja” (manipulátorakarja) lesz, ezekkel ragadja meg, mozgatja és teszi a helyére az építés alatt lévő gépezet egyes atomjait. A leírás után felhívja rá a figyelmet, hogy a molekuláris összeállító nanorobot számára elérhető szűkös helyen ennyi ujj egyszerűen nem férhet el (ezt hívja a „vastag ujjak” problémájának), és hogy az ujjak a molekuláris vonzó kölcsönhatások miatt engednék el atomterhüket (ez a „ragadós ujjak” problémája). Arra is kitér, hogy egy tipikus kémiai reakció általában öt-tizenöt atom „bonyolult, háromdimenziós keringője”.

Valójában azonban Drexler felvetése egyáltalán nem is hasonlít a Smalley által eltorzított elméletre. Drexler és legtöbb követője mindössze egyetlen „ujj” használatát feltételezi. Továbbá igen széles körű leírások és elemzések készültek az elképzelhető szerszámhegy-vegyületekről, és egyikben sem szerepel, hogy úgy fognák meg és tennék a helyükre az atomokat, mintha azok mechanikus tárgyak lennének. A fentebb már említett példák mellett (mint például a DNS-kéz) az azóta eltelt évek során széles körben megerősítést nyert, hogy a hidrogénatomok mozgatása Drexler „propinil hidrogénabsztrakciós” hegyének felhasználásával megvalósítható.^[427] Az 1981-ben az IBM által kifejlesztett pásztázószondás mikroszkóp (SPM, *scanning probe microscope*) és a még összetettebb atomerő mikroszkóp (AFM) tűhegy és az adott molekuláris struktúra meghatározott reakciói segítségével képes elhelyezni akár egyes atomokat is, és ez is tovább igazolja az alapkonceptiót. Nemrégiben az Oszakai Egyetem tudósai egy atomerő mikroszkóp segítségével több egyéni, nemvezető atomot mozgattak elektromos helyett mechanikus módszerrel.^[428] A jövő molekuláris nanotechnológiájának elektromosan vezető és nemvezető atomokat és molekulákat is tudnia kell mozgatni.^[429]

Valójában, ha Smalley kritikája igaz lenne, nem is tudnánk vitába szállni vele, mert maga az élet nem alakulhatott volna ki, hiszen a biológia összeállítója pontosan azt csinálja, ami Smalley állítása szerint lehetetlen.

Smalley azzal az ellenvetéssel is előállt, hogy bármilyen „elszántan dolgozna [*a nanobot*]... még egy termék parányi részének előállítása is... több millió évbe telne”. Smalley-nek abban természetesen igaza van, hogy egyetlenegy nanobot nem hozna létre értékelhető mennyiségű terméket.

De a nanotechnológia alapkoncepciója épp az, hogy több billió nanobot felhasználásával remélünk értelmezhető eredményeket elérni, és épp ez az, amiért olyan nagy figyelem irányul a technológia biztonsági aspektusaira. Ahhoz, hogy ennyi nanobotot ésszerű költségek mellett előállíthassunk, valamilyen szintű önsokszorosító képességgel kell bírniuk, és bár ez megoldaná a gazdasági kérdést, igen súlyos lehetséges veszélyforrásként merül fel. Erre a kockázatra a 8. fejezetben bővebben kitérek. A biológia ugyanezt a megoldást használja fel a több billió sejtből álló szervezetek megalkotásánál, és az az igazság, hogy szinte minden kór a biológia önsokszorosító folyamatának meghibásodásából ered.

A nanotechnológia mögött húzódó koncepcióval szembeni korábbi ellenvetéseket is hatékonyan megválaszták. A kritikusok felvetették: a nanobotok nem kerülhetnék el, hogy hőmozgásuk miatt komoly ütéseknek kapjanak az atommagoktól, atomoktól és molekuláktól. Ez az egyik oka annak, hogy a nanotechnológia konceptuális tervezői hangsúlyozottan gyémántszerű anyagból vagy szén nanocsövekből építenének szerkezeti elemeket. A rendszer erejének vagy merevségének növelésével az anyag kevésbé volna kitéve a hőmozgás destruktív hatásának. A tervek elemzése azt mutatta, hogy ezek a megoldások több ezerszer ellenállóbbak a hőmozgás hatásaival szemben, mint a biológiai rendszerek, így jóval tágabb hőmérsékleti tartományban maradnak működőképesek.^[430]

Hasonló ellenvetések érkeztek a nanotervezett szerkezetek szélsőségesen kis mérete miatt a kvantumhatások pozicionális bizonytalanságát illetően. A kvantumhatások igen számottevőek egy elektron esetében, de egy szénatommag már önmagában több mint húszezerszer nagyobb tömegű, mint egy elektron. Egy nanobotot több milliótól több milliárdig terjedő számú szén- és egyéb atom építene fel, azaz akár billiónyiszor nagyobb tömegű lenne egy elektronnál. Ha ezt az arányt vesszük alapul a kvantumos pozicionálás bizonytalanságának kiszámolásánál, a hatás elenyészőnek bizonyul.^[431]

Az üzemanyag is komoly kérdéseket vetett fel. A glükóz-oxigén üzemanyagsejtekkel dolgozó felvetések jól szerepeltek a Freitas és mások által végzett megvalósíthatósági tanulmányok során.^[432] A glükóz-oxigén megközelítés nagy előnye, hogy a nanogyógyászati alkalmazások felhasználhatják az emberi emésztőrendszer által amúgy is termelt glükózt, oxigént és ATP-t. Nemrég előállítottak egy nikkelpropellert használó, ATP-alapú enzimekkel hajtott nanoméretű motort.^[433]

A legújabb fejlemények a mikro-elektromechanikus rendszerek méretében, vagy akár nanoméretben alkalmazható hidrogén-oxigén üzemanyagcellák terén alternatív megközelítést jelenthetnek; erre a későbbiekben még kitérek.

A vita fokozódik

2003-ban Drexler nyílt levélben válaszolt Smalley-nak a *Scientific American*-ben publikált cikkére.^[434] Húsz év kutatási eredményeit – a sajátjait és másokéit – sorolta fel, és kifejezetten az utóbbi által felvetett „vastag ujjak” és „ragadós ujjak” problémákat célozta meg. Mint fentebb már említettem, a molekuláris összeállítókat sosem írták le úgy, mintha ujjak lennének, hanem mindig is inkább a reaktív molekulák precíz pozicionálásáról volt szó. Drexler a biológiai enzimeket és a riboszómákat hozta fel példaként a természet világában előforduló precíz molekuláris összeállításra. Drexler Smalley saját megállapítását idézve zárta levelét: „Ha egy tudós azt állítja valamiről, hogy lehetséges, talán alábecsüli, mennyi ideig tart majd megvalósítani. Ha azt állítja, hogy valami lehetetlen, akkor nagy valószínűséggel téved.”^[10]

A vita még három kört látott 2003-ban. Smalley Drexler nyílt levelére válaszul visszavonta az általa a „vastag és ragadós ujjak” problémái kapcsán írtakat, és elismerte, hogy az enzimek és a riboszómák valóban épp azt a precíz molekuláris összeállítást végzik, amit ő korábban lehetetlenként

írt le. Ezek után felvetette, hogy a biológiai enzimek csak vízben működnek, és hogy az efféle vízalapú kémia az olyan biológiai szerkezetekre korlátozódik, mint „a fa, a hús vagy a csont”. Mint Drexler kifejtette, ez a megállapítás is téves.^[435] Számos enzim – még azok is, amelyek alapvetően vizes környezetben működnek – képes vízmentes, szerves oldószeres közegben is funkcionálni, sőt: egyes enzimek még gőzfázisú szubsztrátokban, folyadék jelenléte nélkül is hatékonyak.^[436]

Smalley ezek után (levezetés vagy hivatkozás nélkül) kijelentette, hogy az enzimszerű reakciók csak biológiai enzimekkel jöhetnek létre, és csak olyan kémiai reakciókban, ahol a víz is szerepel. Ez is téves állítás. Alexander Klibanov, az MIT kémia- és biomérnök professzora 1984-ben bemutatott efféle, vizet nem szerepeltető enzimkatalízist. Klibanov az alábbiakat írta 2003-ban. „[Smalley] állítása nyilvánvalóan téves a vízmentes enzimkatalízis kapcsán. Több száz, talán több ezer publikáció jelent meg a témában azóta, hogy húsz évvel ezelőtt közzétettük első dolgozatunkat.”^[437]

Nem nehéz belátni, a biológiai evolúció miért részesítette előnyben a vízalapú kémiát. Bolygónkon nagy mennyiségben elérhető a víz, testünk, ételeink, sőt minden szerves anyag 70–90%-a vízből áll. A vízmolekulák háromdimenziós elektromos jellemzői igen erősek, és képesek felbontani más vegyületek erős kémiai kötéseit. A vizet „univerzális oldószernek” hívják, mert testünk szinte minden biokémiai folyamatában jelen van – kijelenthetjük, hogy bolygónkon az élet kémiája elsősorban a víz kémiája. De a technológiánk elsősorban épp olyan rendszereket kíván kifejleszteni, amelyeket nem kötnek a kizárólagosan vízalapú kémiát és fehérjéket alapul választó biológiai evolúció korlátai. Léteznek röpképes biológiai rendszerek, de ha tízezer méteren akarunk repülni, vagy több ezer kilométer per óra sebességgel, akkor inkább a modern technológiát hívnánk segítségül, mint a fehérjéket. Az emberi agyhoz hasonló biológiai rendszerek képesek emlékezni dolgokra és számolni, de ha több milliárdnyi információmorzsából akarunk adatot kinyerni, hasznosabb az elektronikus technológiához folyamodni, mint pusztán az emberi elmére támaszkodni.

Smalley tudomást sem vesz az elmúlt évtized kutatásairól például azon a téren sem, hogy milyen alternatív megoldásokkal lehetne molekulatöredékeket pozicionálni precízen irányított molekuláris reakciókon keresztül. A gyémántszerű anyagok pontosan irányított szintézisét kimerítően tanulmányozták; többek közt megvizsgálták azt a lehetőséget, hogy egyetlen hidrogénatomot távolítsanak el egy hidrogénezett gyémánt felületről^[438] és azt az opciót is, hogy egy vagy több szénatomot adjanak a gyémánt felületéhez.^[439] Ehhez kapcsolódóan olyan kutatásokat végeztek a Caltech Anyag- és Folyamatszimulációs Központjában, az Észak-Karolinai Állami Egyetem anyagtudományi és mérnöki karán, a Kentucky-i Egyetem Molekuláris Gyártási Intézetében, az Amerikai Haditengerészeti Akadémián, és a Xerox Palo Alto Kutatóközpontban, melyek alátámasztják a hidrogéntávolítás és a precízen irányított gyémántszerű anyag szintézisének megvalósíthatóságát.^[440]

Smalley mintha elfeledkezne a fentebb már említett, bevált pásztázószondás mikroszkópról is, bár az is precízen irányított molekuláris reakciókat használ. Ezen koncepciókból kiindulva Ralph Merkle olyan lehetséges szerszámhegy-reakciókat írt le, melyekben akár négy reagens is szerepelhetne.^[441] Igen kiterjedt irodalma van a pozícióspecifikus reakcióknak, amelyek elméletileg precízen irányíthatóak lehetnek, és így megfelelhetnek a molekuláris összeállító szerszámhegyéhez szükséges feltételeknek.^[442] Újabban számos, a pásztázószondás mikroszkópnál is hatékonyabb műszer bukkant fel, ezek megbízhatóan képesek manipulálni az atomokat és a molekulatöredékeket.

2003. szeptember 3-án Drexler válaszolt Smalley levelére, melyben az ő eredeti írására reagált, és újfent utalt arra a nagy terjedelmű szakirodalomra, amit Smalley figyelmen kívül hagyott.^[443] Párhuzamot vont egy modern gyárral, épp csak nanoméretben. Olyan elemzéseket idézett az átmenetiállapot-elméletről, melyek arra utaltak, hogy megfelelően kiválasztott reagensek

esetén a pozicionális irányítás meghertzes frekvenciákon megvalósítható lehet.

Smalley válaszelevele a pontos idézetek és az aktuális kutatások terén ismét igen rövid volt, a pontatlan metaforakén azonban annál hosszabb.^[444] Például azt írta, hogy „hasonlóképp ahhoz, ahogy egy fiút és egy lányt nem lehet szerelemre bírni pusztán azzal, hogy egymásnak lökjük őket, a precíz kémiát sem lehet kieroeltetni két molekuláris tárgy közt egyszerű mechanikus mozgással... nem lehet annyival megoldani, hogy egyszerűen csak egymáshoz tolunk két molekuláris tárgyat”. Ismét elismeri, hogy az enzimek valójában pont ezt teszik, de továbbra sem hajlandó elfogadni, hogy efféle reakciók a biológiai rendszereken kívül lehetségesek volnának: „Ezért is vettem rá, hogy... igazi kémiáról és igazi enzimekről beszéljünk... Minden ilyen rendszernek folyékony közegre lesz szüksége. Az általunk ismert enzimek számára ennek víznek kell lennie, és azok a dolgok, amelyeket vizes környezetben szintetizálni lehet, nem terjedhetnek túl számottevően a biológia húsán és csontján.” Smalley érvrendszere nagyjából az, hogy „X ma nem létezik, tehát X teljességgel lehetetlen”. Ezzel az érvfajttával ismételten találkozhatunk a mesterséges intelligencia területén. A kritikusok állítják, hogy a pillanatnyi rendszerek korlátai bizonyítják, hogy ezek a korlátok a rendszer velejárói, és mint ilyenek, legyőzhetetlenek. Ezek a kritikusok például figyelmen kívül hagyják a pillanatnyilag létező MI-változatok terjedelmes listáját (lásd: *A gyenge MI használatának példái*), melyek olyan, ma üzleti forgalomban lévő, működő modellek, amik egy évtizede még csak kutatási programok voltak.

Mi, akik jól megalapozott módszertanok alapján próbáljuk előre jelezni a jövőt, nagy hátrányban vagyunk. A jövő egyes realitásai elkerülhetetlenek, de egyelőre nem nyilvánultak meg, így könnyen letagadhatóak. A XX. század elején gondolkodók egy kis csoportja állította, hogy lehetséges a levegőnél nehezebb repülőgép, de a közgondolkodást követő szkeptikusok csak annyit mondtak, ha valóban lehetséges, miért nem mutatta még be senki sem?

Smalley feltárta az indítékainak egy részét a következő levele végén:

„Pár héttel ezelőtt előadást tartottam a nanotechnológiáról és az energiáról. Légy tudós, mentsd meg a világot! volt a címe, és mintegy hétszáz középiskolás hallgató vett rajta részt a Spring Branch ISO tanulmányi programban, egy nagy, Houston környéki állami iskolarendszerben. A látogatásom előtt arra kértük a diákokat, hogy Miért vagyok nanobolond? címmel írjanak egy-egy esszét. Több százan meg is írták, és abban a szerencsében részesültem, hogy elolvashattam a legjobb harmincat, és kiválaszthattam az öt legkiemelkedőbbet. Az olvasott dolgozatok közel fele feltételezte, hogy az önsokszorosító nanobotok lehetségesek, és a többségüket komolyan aggasztotta, hogy mi vár rájuk a jövőben, ha ezek a robotok elterjednek. Minden tölem telhetőt megtettem, hogy csillapítsam a félelmüket, de semmi kétség nem fér hozzá, hogy ezeknek a kamaszoknak nagyon aggasztó esti meséket mondtak. Önök és az elvbarátaik megrémítették a gyermekeinket.”

Szívesen felhívnám rá Smalley figyelmét, hogy a szkeptikusok korábban kifejtették: egy az egész világra kiterjedő kommunikációs rendszer megvalósíthatatlan, de még ha az is lenne, nem terjedhetnének rajta szoftvervírusok. Ma mind a gyümölcseit, mind a gyengeségeit megtapasztalhatjuk ennek a kapacitásnak. De a szoftvervírusok veszedelmére válaszul megjelent a technológiai immunrendszer. Sokkal több hasznunk, mint kárunk származik az ígért és a hozzá tapadó fenyegetés ezen legfrissebb példájából is.

Smalley nem jól közelíti meg, hogy miként kellene megnyugtani az átlagembereket azzal

kapcsolatban, hogy ezzel a jövőbeli technológiával esetleg vissza is lehet élni. A nanotechnológiai alapú alkotás lehetőségének tagadásával az abban rejlő potenciált is megtagadja. Ha a molekuláris összeállítás ígéretét és veszedelmét egyaránt tagadjuk, az visszaüt, és nem segíti a kutatás elengedhetetlenül szükséges, konstruktív irányba való terelését. A 2020-as évekre a molekuláris összeállítók olyan eszközökkel láthatnak el minket, melyek hatékonyan felvehetik a harcot a szegénység ellen, megtisztíthatják a környezetünket, legyőzhetik a betegségeket, meghosszabbíthatják az emberi életet, és még számos más pozitív változással járhatnak. Az emberiség által megalkotott minden más technológiához hasonlóan ezt is fel lehet arra használni, hogy az emberiség pusztító hajlamait támogassa. Fontos, hogy előrelátóan közelítsük meg ezt a technológiát, hogy az ígért előnyöket elérhessük, a veszedelmeket pedig elkerülhessük.

Korai alkalmazások

Bár Drexler nanotechnológiai koncepciója elsősorban a gyártás precíz molekuláris irányításával foglalkozott, idővel kiterjedt minden olyan technológiára, amelyek kulcselemei a nanométerek szerény léptékében mérhetőek (általában száz nanométer alattiak). Miképp a jelenlegi elektronika szép csendben becsusszant ebbe a tartományba, a biológiai és gyógyászati alkalmazások is beléptek a nanorészecskék korszakába, és nanoméretű tárgyakat fejlesztenek a hatékonyabb vizsgálatokhoz, illetve kezelésekhez. Bár a nanorészecskéket inkább statisztikai gyártási módszerekkel állítják elő, mint összeállítókkal, a hatásuk ugyanúgy atomi méretükből fakadó tulajdonságaikon keresztül érvényesül. Példának okáért az, hogy a kísérleti biológiai vizsgálatok során nanorészecskéket használnak jelölőként és címkeként, nagyban növeli a fehérjékhez hasonló anyagok észlelésének érzékenységet. A mágneses nanocímkek például kapcsolódhatnak az antitestekhez, és mágneses szondával leolvashatóak, mialatt még a testben vannak. Sikeres kísérleteket végeztek olyan arany nanorészecskékkel, amelyek a DNS egyes szegmenseihez kapcsolódnak, és gyorsan visszakereshetővé tesznek adott DNS-szekvenciákat egy mintán belül. Bizonyos parányi, nanoméretű gyöngyökbe, az úgynevezett „kvantumpöttyökbe” több szint tartalmazó, specifikus kódok táplálhatók a színes vonalkód mintájára, és a segítségükkel könnyen nyomon követhető egyes anyagok útja a testen belül.

A fejlesztés alatt álló mikrofolyadékos eszközökben nanoméretű csatornák segítik elő, hogy egy adott anyag parányi mintáján is több száz vizsgálatot végezhessenek egy időben.

Nanoállványzatok felhasználásával növesztettek biológiai szövetet is, például bőrt. A jövő orvosi eljárásai során ezen miniatűr állványzatok segítségével bármilyen megjavítandó szövettípust növeszthetnek a testen belül.

Különösen izgalmas az az alkalmazás, ami nanorészecskék irányításával a test adott pontján képes kezelést végezni. A nanorészecskék a sejtfalakba kormányozhatják a gyógyszereket, át a vér–agygáton. A montreali McGill Egyetem kutatói egy 25–45 nanométeres szerkezettel bíró nanopirulát mutattak be.^[445] A nanopirula elég kicsi ahhoz, hogy átjusson a sejtfalon, és egyenesen a sejten belül megcélzott struktúrához juttassa el a gyógyszert.

Japán tudósok száztíz aminosavból álló nanoketreceket hoztak létre. A ketrecekben gyógyszermolekulák találhatóak. Minden egyes nanoketrec felszínéhez egy-egy olyan peptid kapcsolódik, amely az emberi test megadott pontjaival létesít kötést. Az egyik kísérletben a tudósok olyan peptidet használtak fel, amelyik az emberi májsejtek egy meghatározott receptorával alakít ki kötést.^[446]

Massachusettsben lévő bedfordi illetőségű MicroCHIPS bőr alá ültethető, számítógépesített készüléket fejlesztett ki, amely gyógyszerek precíz keverékét adagolja a szerkezeten belül található

több száz nanoméretű edényből a testbe.^[447] A készülék jövőbeni változatai a tervek szerint képesek lesznek egyes anyagok, például a cukor szintjét mérni a vérben. A rendszert mesterséges hasnyálmirigyként használhatnánk, ami a vércukorszintre válaszul pontosan adagolja az inzulint a szervezetnek. De tetszőleges más hormontermelő szervet is képes lenne szimulálni. Ha a próbák rendben mennek, a rendszer akár 2008-ra piacon lehet^[411]. Szintén igen innovatív felvetés, hogy arany nanorészecskéket irányítsanak egy daganathoz, majd infravörös sugárral felmelegítve elpusztítsák a rákos sejteket. Nanoméretű csomagokat lehetne arra tervezni, hogy a bennük rejlő gyógyszert megvédjék az emésztőrendsztől, és adott helyre szállítsák, aztán összetett módon adagolják, azt sem kizárva, hogy esetleg a testen kívülről érkező utasításoknak engedelmesskednek. A floridai Alachuában található Nanotherapeutics által kifejlesztett, alig pár tucat nanométer vastag, biológiailag lebontható polimer ezt a megközelítést használja.^[448]

A szingularitás szolgálatában

Jelenleg a világ energiatermelése mintegy tizennégy billió (úgy 10^{13}) watt. Ennek az energiának nagyjából 33%-a olajból, 25%-a szénből, 20%-a gázból, 7%-a atomerőműből, 1,5%-a biomasszából és vízen energiából származik, és csak mintegy 0,5%-ot tesz ki a nap-, a szél- és a geotermikus energia.^[449] A légszennyezettség túlnyomó része és a vízszennyezettség, valamint az egyéb szennyeződések ezen energiaforrások kitermeléséből, szállításából és feldolgozásából származnak, és felemésztik a nem megújuló energiaforrások mintegy 78%-át. Az olajból származó energia mindemellett geopolitikai feszültséget is kelt, és ott van még az az apróság, hogy az egész mintegy kétbillió dollárba kerül évente. Bár az ipari korszak energiaforrásai, amelyek a mai napig uralják az energiatermelést, a nanotechnológiai alapú kitermelési, továbbítási és feldolgozási módszerekkel hatékonyabbá válnak, a megújuló energiaforrásoknak kell átvállalniuk a jövőbeni energianövekedés oroszlánrészét.

2030-ra a számítás és a kommunikáció ár–teljesítmény-aránya a maihoz képest tíz-százmilliószoros lesz. Más technológiák kapacitása és hatékonysága hihetetlen mértékben megnövekedik. Az energiaigény ennek ellenére sokkal lassabban növekszik majd a technológiai kapacitásnál, mivel az energiafelhasználás jóval hatékonyabbá válik – erre a későbbiekben még kitérek. A nanotechnológiai forradalommal járó elsődleges következtetés az, hogy az olyan fizikai technológiák, mint a termékek előállítása vagy az energia, a gyorsuló megtérülés törvénye alá fognak esni. Tulajdonképp minden technológia információs technológia lesz, beleértve ebbe az energiát is.

A világ energiaszükséglete becslések szerint 2030-ra a mai kétszerese lesz, lényegesen kevesebb, mint a becsült gazdasági növekedés, és messze elmarad a technológiai kapacitás várt fejlődésétől.^[450] A további szükséges energia feltehetően az újfajta nanoméretű nap-, szél- és geotermikus technológiákból fog származni. Fontos felismerni, hogy a mai energiaforrások többsége is valamely formában a napenergia hasznosításán alapul.

A fosszilis tüzelőanyagokban az állatok és növények által megfelelő kémiai folyamatok során átalakított napenergia tárolódik (bár azt az elméletet, hogy a fosszilis tüzelőanyagok valóban élő szervezetekből származnának, az utóbbi időben néhányan megkérdőjelezték). De a kőolaj kitermelése az olajkutakból már elérte a maximumát, sőt egyes szakértők szerint már csökkenő ütemet mutat. Az mindenképp egyértelmű, hogy gyors tempóban merítjük ki a könnyen hozzáférhető fosszilis üzemanyagokat. Igen nagy fosszilisüzemanyag-tartalékunk van, ám azt csak bonyolultabb technológiával tudjuk kiaknázni tisztán és hatékonyan (például szénből vagy olajpalából – ezek alkotják a jövő energiaiparának alapjait). A most épített, milliárd dolláros bemutató erőmű, a

FutureGen a tervek szerint a világ első nulla kibocsátású fosszilisüzemanyag-erőműve lesz.^[451] Ahelyett, hogy a mai eljárásoknak megfelelően egyszerűen elégetné a szenet, a 275 megawattos erőmű azt hidrogénből és szénmonoxidból álló szintetikus gázzá alakítja. Ez a gáz reakcióba lépve a gőzzel hidrogént és szén-dioxidot produkál, melyeket leválasztanak. A hidrogént ezek után üzemanyagcellákban használhatják fel, vagy elektromos árammá és vízzé alakítják. A gyár terveinek kulcsfontosságú része a hidrogént és a szén-dioxidot elválasztani képes új anyagokból készült membrán.

Elsősorban azonban a tiszta, megújuló, eloszló és biztonságos energetikai technológiák kifejlesztésén lesz a hangsúly – mert a nanotechnológia segítségével erre is képesek leszünk. Az elmúlt évtizedek során az energetikai technológiák az ipari kor S-görbéjének leszálló ágán tanyáztak (az adott technológiai paradigma kései szakaszában, ahol a lehetőségek lassan közelítenek egy aszimptotához vagy korláthoz). Bár a nanotechnológiai forradalomnak új energiaforrásokra lesz szüksége, egyben új S-görbét vezet be az energia minden aspektusában – a termelésben éppúgy, mint a tárolásban, a továbbításban vagy a felhasználásban – már a 2020-as évekre.

Vegyük sorra ezeket az aspektusokat fordított sorrendben, a felhasználásnál kezdve! Mivel a nanotechnológia képes szélsőségesen parányi méretben, az atomok és a molekulatöredékek szintjén kezelni az anyagot és az energiát, az energia felhasználása sokkal hatékonyabb lesz, azaz csökken az energiaigény. Az elkövetkezendő évtizedek során a számítás átmegy a reverzibilis számításra (lásd: *A számítógép-használat korlátai* a 3. fejezetben)

Mint korábban kifejtettem, a reverzibilis logikai kapukkal való számítás elsődlegesen a kvantum- és hőhatásokból származó eseti hibák korrigálásához igényel energiát. Ennek eredményeképp a reverzibilis számítás energiaszükséglete akár egymilliárdszor kisebb lehet, mint a nonreverzibilis számításé. Továbbá a logikai kapuk és a memóriaelemek is kisebbekké válnak, minden dimenzióban legalább a mostani méret tizedére zsugorodnak, tehát ezzel is ezredére csökken az energiaszükséglet. A fejlett nanotechnológia ennek megfelelően tehát minden egyes bit átkapcsolásának energiaigényét a mostani egybilliomod részére csökkentené. Természetesen ennél jóval nagyobb mértékben megnöveljük majd a számítások mennyiségét, de ez a jelentősen feljavított hatékonyság nagyban lefedi majd ezt a növekedést.

A molekuláris nanotechnológia gyártási folyamatai is jóval energiahatékonyabbak lesznek a jelenlegi gyártási folyamatoknál, amelyekhez viszonylag nagy pazarlással kell jelentős mennyiségű árut szállítani egyik helyről a másikra.

A gyártási folyamatok ma rengeteg energiát áldoznak az alapanyagok, például az acél előállítására is. Egy tipikus nanogyár gyakorlatilag egy asztalon is elfér, és a számítógéptől a ruháig bármilyen terméket elkészít. A nagyobb termékeket (járműveket, lakóházakat, vagy további nanogyárakat) moduláris alrendszerek hoznák létre, ezeket nagyobb robotok állítanák össze. Az elszökő hő, ami a nanogyártás elsődleges energiaigényének számít, befognák és újrahasznosítanák.

A nanogyárak energiaszükséglete elhanyagolható. Drexler úgy becsüli, hogy a molekuláris gyártás inkább energiát termel majd, mint energiát fogyaszt. Szerinte „a molekuláris gyártási folyamatot a betáplált anyagok kémiai energiatartalma hajtáná, melléktermékként elektromos energiát termelve (már csak azért is, hogy könnyítsen a hőelvezetés követelményein)... Tipikus szerves alapanyagok felhasználásával, és a többlethidrogén oxidálásával számolva, az ésszerűség határain belül hatékony molekuláris gyártási folyamat nettó energiatermelőnek számít”.^[452]

A termékek új nanocsőalapú és nanokompozit anyagokból is készülhetnének, ezzel elkerülve azt a hatalmas energiafelhasználást, amit manapság az acél, a titán és az alumínium előállítására fordítunk.

A nanotechnológiás alapú világítás kicsiny, hideg, LED-ekkel, kvantumpöttyökkel és egyéb innovatív fényforrásokkal váltaná le a forró, nem hatékony izzólámpákat és fénycsőveket.

Bár a gyártott termékek funkcionalitása és értéke növekedni fog, a termékek mérete általánosságban nem növekszik majd (és egyes esetekben, például az elektronikus eszközöknél, inkább csökken majd). A gyártott termékek magasabb értéke javarészt az információs tartalom növekvő értékének lesz köszönhető. Bár az információalapú termékek és szolgáltatások közel ötvenszázalékos deflációja ebben az időszakban sem csökken, míg az értékes információ mennyisége még nagyobb, szinte már szédítő iramban fog növekedni.

A második fejezetben már kifejtettem, hogyan hat a visszatérő nyereség törvénye az információ kommunikációjára. A kommunikált információ mennyisége továbbra is hatványozottan növekedni fog, de a kommunikáció hatékonysága is közel ilyen mértékben fejlődik, így a kommunikáció energiaszükséglete csak lassan fog gyarapodni.

Az energia továbbítása is jóval hatékonyabbá válik. Manapság rengeteg energia elvész továbbítás közben, vagy a vezetékek felforrósodása, vagy az üzemanyag szállítása miatt, ami ráadásul nagyban károsítja a környezetünket is. Smalley bármennyire erőteljesen kritizálta is a molekuláris nanogyártás lehetőségét, mindig is támogatta az energiatermelés és -továbbítás új, nanotechnológiai alapú paradigmáját. Leírása alapján az új kábelek hosszú drótokba font szén nanocsövekből állhatnának: ezek erősebbek, könnyebbek, és ami a legfontosabb, jóval energiahatékonyabbak a hagyományos rézdrótoknál.^[453] Elképzelései szerint a nagyobb hatékonyság érdekében szupravezető vezetékekkel válthatjuk ki az elektromos motorok alumínium- és rézhuzalait is. Smalley elképzelése egy nanótámogatott jövőbeni energiáról az alábbi új jellemzőkre is kiter:^[454]

- Napenergia: a napelemek árának tizedére-századára csökkentése.
- Hidrogén-előállítás: a napfény segítségével a vízből hatékonyan hidrogént előállítani képes új technológiák kifejlesztése.
- Hidrogéntárolás: könnyű, erős anyagok az üzemanyagcellákhoz használt hidrogén tárolására.
- Üzemanyagcellák: az üzemanyagcellák költségének tizedére-századára csökkentése.
- Energiatároló elemek és szuperkondenzátorok: az energiatarolás sűrűségének tízszeresére-százszorosára javítása.
- A közlekedési eszközök, például autók és repülőgépek hatékonyságának fejlesztése erős és könnyű nanoanyagok létrehozásával.
- Nagy léptékű urbani – például a Holdon történő – energia-előállítás céljaira kifejlesztett erős, könnyű nanoanyagok.
- Nanoméretű elektronikát használó, mesterséges intelligenciával bíró robotok az űrben és a Holdon használt energiatermelő szerkezetek automatikus létrehozatalára.
- Nanoanyag-bevonatok, melyekkel nagyban lehetne csökkenteni lehet a mélyfúrások költségeit.
- Nanokatalizátorok, melyek segítségével igen magas hőfokon nagyobb hatékonysággal nyerhető ki energia a szénből.
- Nanoszűrők, melyek befogják a keletkező kormot. A korom túlnyomórészt szénből áll, és a szén a legtöbb nanotechnológiai terv alapépítőeleme.
- Újfajta anyagok, melyek segítségével megvalósulhat a geotermikus források „forró, száraz kőzet” technológiájú kiaknázása (azaz a földbelső hőenergiájának felhasználása).

Az energia továbbítására alternatívát jelenthet a mikrohullámú sugárzás is. Ez a módszer különösen arra lenne jó, hogy hatékonyan sugározzuk tovább az űrbe telepített, óriási napelemek termelte

energiát (lásd alább).^[455] Az ENSZ Egyetemének Amerikai Tanácsa által létrehozott Millennium Projekt a mikrohullámú energiatovábbítást tartja a „tisztá, bőséges jövőbeni energia” kulcsának.^[456]

Az energiatárolás manapság erősen központosított. Ez kulcsfontosságú pontokon teszi sérülékennyé a folyékonygáz-tartályokat és egyéb tárolóegységeket például egy esetleges terroristacsapás során, ami katasztrofális következményekkel járhat. Az olajszállító tartálykocsik és hajók is épp ilyen kiszolgáltatottak. Az energiatárolás jövője az üzemanyagcellákban rejlik, ez végül az infrastruktúra minden szintjén elterjed, újabb példát szolgáltatva a nem hatékony és sérülékeny központosított telepeket leváltó hatékony és egyenletes elosztású rendszerekre.

A hidrogén-oxigén üzemanyagcellák, ahol a hidrogént metanolból és más, hasonlóan biztonságos, hidrogénben gazdag alapanyagokból nyerjük, jelentős fejlődésen mentek keresztül az elmúlt pár évben. Egy kis massachusettsi cég, az Integrated Fuel Cell Technologies bemutatott egy úgynevezett mikro-elektromechanikus (Micro Electronic Mechanical System, MEMS) alapú üzemanyagcellát.^[457] Minden egyes postai bélyeg méretű készüléken több ezer mikroszkopikus üzemanyagcella található, melyek már tartalmazzák a csöveket és az irányító elektronikát. A NEC azt tervezi, hogy a közeljövőben nanocsöveken alapuló üzemanyagcellákat vezessen be a laptopoknál és egyéb hordozható elektronikai eszközöknél is.^[458] Állításuk szerint a kis energiaforrások akár negyven órán át működtetni tudják majd az eszközöket. A Toshiba is dolgozik a hordozható elektronikai eszközökhöz való üzemanyagcellákon.^[459]

A gépeket, járműveket, vagy akár otthonokat energiával ellátó nagyobb üzemanyagcellák terén is jelentős az előrehaladás. Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma egy 2004-es jelentésben azt a következtetést vonta le, hogy a nanoalapú technológiák egy hidrogén-üzemanyagcellás autó minden aspektusát képesek ellátni.^[460] Például a hidrogént nagy nyomásnak is ellenálló, erős, de könnyű tartályokban kell tárolni. Az olyan nanoanyagok, mint a nanocsövek és a nanokompozitok, alkalmasak lennének ilyen tartályok kialakítására. A jelentésben olyan üzemanyagcellákról írnak, amelyek kétszer hatékonyabban működnek, mint a benzinmotorok, és hulladékként is csak vizet termelnek.

Számos jelenlegi üzemanyagcella-tervezetben metanolból nyernék a hidrogént, mely aztán a levegőben található oxigénnel keveredve vizet termelne, és energiát. A metanol (faszesz) azonban nehezen kezelhető anyag, továbbá biztonsági aggályokat kelt, mivel mérgező és gyúlékony. A St. Louis-i Egyetem kutatói olyan stabil üzemanyagcellát mutattak be, amely közönséges etanollal (emberi fogyasztásra is alkalmas gabonaszesszel) működik.^[461] Ez a készülék egy dehidrogenáz nevű enzimet használ, ami leválasztja a hidrogénionokat az alkoholoról. A hidrogénionok ezután reakcióba lépnek a levegővel, és energiát termelnek. A cella minden jel szerint szinte bármilyen emberi fogyasztásra alkalmas alkohollal működik. „Jó néhány típussal kipróbáltuk – mondta Nick Akers, a projekten dolgozó, végzős hallgató. – A szénsavas sört nem szerette, és mintha a borral sem lett volna igazán jóban, de minden mással rendben működött.”

A Texasi Egyetem kutatói olyan nanobot méretű cellát hoztak létre, amely egyenesen az emberi vérben található glükóz-oxigén-reakció révén állít elő elektromos áramot.^[462] A „vámírbót” néven emlegetett cella kellő energiát termel a hagyományos elektronikus szerkezetek működtetéséhez, és talán fel lehet használni a jövőben a vérben keringő nanobotok működtetéséhez is. Hasonló projekten dolgozó japán tudósok arra a becslésre jutottak, hogy a rendszerük csúcsteljesítménye elméletileg akár száz watt is lehet (egyetlen ember vérmennyiségére számolva), bár a beültethető készülékek nyilván jóval kevesebbet használnának. (Sydney-ben egy újság meg is jegyezte, hogy ez a projekt alátámasztja a *Mátrix*-filmekben felmerült ötletet, mely szerint az embereket elemként lehetne

használni.) {463}

Egy másik megközelítés a természet világában nagy mennyiségben megtalálható cukorból nyerne elektromosságot. Ezt a Massachusettsi Egyetem két szakembere, Swades K. Chaudhuri és Derek R. Lovley mutatta be. Az ő üzemanyagcellájukban valódi mikrobák vannak (*Rhodospirillum rubrum* baktériumok). Lenyűgöző, 81%-os hatékonysággal működik, és ha épp nincs aktív használatban, szinte semmi energiát nem fogyaszt. A baktérium egyenesen a glükózból termeli az elektromosságot, és nem hoz létre instabil mellékterméket. A baktérium a cukor segítségével reprodukálja magát, azaz mindig újratermelődik, tehát stabilan és folyamatosan tudja biztosítani az elektromos energiát. A rendszer más cukortípusokkal – például fruktózzal és xilózzal is – épp ilyen sikeresen működött. Az ezen a kutatáson alapuló üzemanyagcellák felhasználhatják a valódi baktériumokat, vagy közvetlenül alkalmazhatják a baktériumok által előállított kémiai reakciókat. Mindamelllett, hogy cukorban dús vérben ellátnák üzemanyaggal a nanobotokat, ezek a készülékek képesek lehetnek arra is, hogy energiát termeljenek az ipari és mezőgazdasági hulladékból.

Ígéretes az is, hogy a nanocsövek nanoméretű akkumulátorként tárolhatják az energiát, és a nanotervezett üzemanyagcellák vetélytársai lehetnek. {464} Ez tovább színesíti a nanocsövek amúgy is lenyűgöző sokoldalúságát: már bebizonyították, hogy alkalmasak hatékony számításokra, az információ kommunikálására, az elektromos áram továbbítására, és szélsőségesen erős szerkezetű anyagokat is létre lehet hozni belőlük.

A nanoanyagok támogatta energia legígéretesebb formája a napenergia, amelyben ott rejlik a lehetőség, hogy jövőbeni energiaigényünk nagyját teljesen megújuló, károsanyag-kibocsátástól mentes módon, helybeli előállítással oldjuk meg. A napelembe jutó napfény nem kerül semmibe. A Földet érő napfény nagyjából 10^{17} watt teljesítménynek felel meg, ez körülbelül tízezerszer több, mint a jelenleg az emberi civilizáció által felhasznált 10^{13} watt. {465} Mint korábban már említettem, a következő negyedszázadban várható, elképesztő ütemű számítási és kommunikációs ugrás és az ebből következő gazdasági növekedés ellenére a nanotechnológia ezen is túlmutató energiahatékonysága azt sugallja, hogy az energiaszükségletünk szerényebben nő, csak nagyjából harmincbillió watt (3 x 10^{13}) 2030-ra. A teljes igényt fedezhetnénk a napenergiából, és elég lenne hozzá csak a Nap Földre sugárzott energiájának 0,0003 részét (három tízezredét) felhasználnunk.

Érdekes ezeket a számokat összevetni az emberi faj anyagcseréjének teljes energiakibocsátásával, amit Robert Freitas 10^{12} watt (1000 watt) becsül, és a Föld teljes növényzetére vonatkozó számmal, amelyet 10^{14} watt (1000 watt) tippel. Freitas becslése szerint az az energia, amit anélkül termelhetünk és használhatunk fel, hogy felborítanánk a jelenlegi földi biológiai rendszer fenntartásához szükséges globális energia-egyensúlyt, nagyjából 10^{15} watt körül lehet. Ez személyenként is igen jelentős számú nanobot alkalmazását tenné lehetővé az intelligencia növelésére és gyógyászati célokra, valamint olyan egyéb alkalmazásokra, mint az energiatermelés vagy a környezet megtisztítása. Ha nagyjából tízmilliárdos (10^{10}) globális emberi lakosságot feltételezünk, Freitas számításai szerint egyénenként 10^{16} (tízezer billió) nanobot lenne elfogadható ezen a határon belül. {466} Egyénenként csak mintegy 10^{11} nanobotra (ennek a tízmilliomod részére) lenne szükségünk ahhoz, hogy minden egyes idegsejthez egy nanobotot rendeljünk. Mire a technológia ilyen mértékre fejlődik, képesek leszünk a nanotechnológia segítségével befogni és újrahasznosítani a nanobotok és egyéb nanogépezetek termelte hő legalábbis jelentős részét, és azt ismét energiává alakítani. Ennek a leghatékonyabb módja talán az lenne, ha az energia-újrahasznosítót magába a nanobotba építenénk. {467} Ez nagyban hasonlít a számításoknál látott reverzibilis logikai kapukra, ahol minden egyes logikai kapu tulajdonképp azonnal újra felhasználja a legutóbbi számításához felhasznált energiát.

Szén-dioxidot is kivonhatunk az atmoszférából, hogy ellássuk szénrel a nanogépezeteket, ami

visszafordítaná a jelenlegi, iparosodás korára jellemző technológiák okozta széndioxid-növekedést. Ez ügyben viszont nem ártana nagyon gondosan odafigyelnünk, hogy épp csak visszafordítsuk az elmúlt jó néhány évtized növekedését, nehogy a globális felmelegedés helyett globális lehűlést okozzunk!

Az eddig működésbe állított napelemek meglehetősen alacsony hatásfokúak, ám igen drágák, de a technológia gyors ütemben fejlődik. A napenergia elektromos árammá alakításának hatékonysága a szilícium napenergia-cellák tekintetében egyenletesen javul: 1952-ben még csak 4% körül volt, de 1992-ben már 24%.^[468] A jelenlegi, többrétegű cellák nagyjából 34%-os hatékonysággal működnek. Egy a nanokristályoknak a napenergia felhasználási hatékonyságára gyakorolt hatását vizsgáló friss jelentés azt mutatja, hogy akár 60%-nál magasabb hatékonyság is elérhető lehet általuk.^[469]

Ma a napenergia becslések szerint 2,75 dollár/wattba kerül.^[470] Számos cég dolgozik nanoméretű napelemek kifejlesztésén abban a reményben, hogy így a napenergia árát a többi energiaforrás alá lehet szorítani. Az ipari források arra utalnak, hogy amint a napenergia az 1 dollár/watt ár alá esik, elég versenyképes lesz ahhoz, hogy közvetlenül ellássa árammal az amerikai országos hálózatot. A napenergia nanoméretű eszközökkel történő kiaknázására irányuló tervek titán-oxid nanorészecskéken alapulnak, melyeket nagyon vékony, hajlékony hárttyákban lehet tömegesen is gyártani. Martin Roscheisen cégvezető becslései szerint ez a technológia akár már 2006-ra ötven cent per watt, azaz a földgáz ára alá csökkentheti a napenergia árát.^[471] Versenytársai, a Nanosys és a Konarka hasonló előrejelzéseket közöltek. Akár megvalósulnak ezek az üzleti tervek, akár nem, amint eljutunk az MNT-(molekulárisnanotechnológia)-alapú gyártásig, képesek leszünk napelemeket (és szinte minden mást) szélsőségesen alacsony áron gyártani, gyakorlatilag a nyersanyag árában, amiből az olcsó szén az egyik legfontosabb. A várhatóan néhány mikronnyi vastagságú napelemek ára végül akár olyan alacsony is lehet, mint egy cent per négyzetméter. Hatékony napelemekkel fedhetnénk le az emberkéz alkotta felületek túlnyomó részét – az épületeket és a járműveket, de beleszőhetnénk a ruhánkba is, hogy feltöltsék a mobileszközeinket. A 0,0003-as konverziós arány igencsak elérhetőnek tűnik a napenergia esetében, és meglehetősen olcsónak is.

A földi felszínek termelte energiát az űrben elhelyezett hatalmas panelekkel is kiegészíthetjük. A NASA már meg is tervezte a Space Solar Power műholdat, amely képes lenne a napfényt az űrben elektromossággá alakítani, és azt mikrohullámon lesugározni a Földre. Minden egyes ilyen műhold több milliárd watt, több tízezer otthon ellátására elegendő elektromosságot termelhetne.^[472] Nagyjából 2029 körül odáig is eljuthat az MNT, hogy hatalmas, a Föld körül keringő napelemtáblákat alkossunk: elég lenne az alapanyagokat felszállítani az űrállomásokra – talán a tervbe vett űrliften, az űrből lelógó, illetve jóval a geoszinkron-pályán túlra felnyúló, szén nanocsőkompozitból készült vékony szalagon.^[473]

Az asztali magfúzió is a lehetőségek között szerepel. Az Oak Ridge Nemzeti Laboratórium kutatói ultrahanghullámok segítségével rezgettek egy folyékony oldatot, ezzel elérve, hogy a gázbuborékok olyan nyomás alá kerüljenek, ahol több millió fokos hőmérsékletet érnek el, melynek eredményeképp a hidrogénatommagok egyesültek, és energia keletkezett.^[474] Bár a hidegfúzióról szóló eredeti bejelentést a többség igen szkeptikusan fogadta 1989-ben, ezt az ultrahangos módszert több más szakember is melegen üdvözölte^{[475][12]}. Ennek ellenére nem tudunk még eleget arról, hogy a gyakorlatban mennyire használható ez a technika, így csak találgatni lehet, miféle szerepet tölthet be a jövő energiaellátásában.

A kibontakozóban lévő nanotechnológiai lehetőségek láttán sejteni lehet, hogy a környezetre is igen nagy hatással lesznek. Ehhez hozzátartozik az is, hogy az újonnan létrejövő gyártási és feldolgozási technológiák drámaian lecsökkentik a nemkívánatos károsanyag-kibocsátást, de az is, hogy az iparosodás korának korábbi hatását semlegesíthetjük. Természetesen az, hogy olyan nanotechnológiailag támogatott, megújuló, tiszta forrásokból fedezzük majd az energiaszükségletünket, mint a nanoszoláris panelek, amint arról már szó volt, nyilvánvalóan az egyik fő törekvésünké válik például a környezetvédelem terén is.

Azzal, hogy molekuláris léptékben építünk részecskéket és eszközöket, nemcsak a méretet csökkentjük le erőteljesen és a felületet növeljük meg, de új elektromos, kémiai és biológiai tulajdonságokkal is megismerkedünk. A nanotechnológia végül elvezet minket a javított katalízis, a kémiai és atomi kötések, az érzékelés, a mechanikus manipuláció egyre kiterjedtebb eszköztárához, a továbbfejlesztett mikroelektronikán keresztüli intelligens irányításról nem is beszélve. Az út végén újratervezzük minden ipari folyamatunkat, hogy minimális káros következménnyel, nemkívánatos melléktermékek és ezek környezetbe juttatása nélkül érjük el a kitűzött célokat. Az előző részben szó esett már egy hasonló trendről a biotechnológiában: az intelligens tervezésű gyógyszerészeti ágensekről, amelyek igen korlátozott mellékhatásokkal képesek elvégezni szigorúan célzott biokémiai beavatkozásokat. A tervezett molekulák megalkotása a nanotechnológia segítségével nagyban fel fogja gyorsítani a biotechnológia forradalmát is.

A kortárs nanotechnológiai kutatások és fejlesztések relatíve egyszerű „készülékekkel” dolgoznak. Ilyenek a nanorészecskék is, a nanorétegek és nanocsövek segítségével előállított molekulák. A nanorészecskék több tíztől több ezerig terjedő számú atomból állnak, általában kristályos szerkezetűek, és az előállításuk kristálynövesztő módszereken alapul, minthogy még nem rendelkezünk precíz nanomolekuláris gyártási módszerekkel. A nanoszerkezetek több rétegből állnak, melyek maguktól állnak össze. Az efféle szerkezeteket általában hidrogén- és szénkötések, illetve egyéb atomi szintű kölcsönhatások tartják össze. A sejtfalhoz vagy a DNS-hez hasonló biológiai szerkezetek a természetben fellelhető példák a többrétegű nanoszerkezetekre.

Mint minden új technológiának, a nanorészecskéknek is megvan a hátrányuk: újfajta mérgező anyagok keletkezhetnek, és más, kiszámíthatatlan módon is kölcsönhatásba kerülhetnek a környezettel és az élő anyaggal. Számos mérgező anyag, például a gallium-arzenid már most bekerül az ökoszisztémába az eldobott elektronikai termékek jóvoltából. Ugyanazok a tulajdonságok, amelyek képessé teszik a nanorészecskéket és a nanorétegeket arra, hogy szigorúan célzott, jótékony hatást fejtsenek ki, előre nem látható reakciókhoz is vezethetnek, különösen az olyan biológiai rendszerek esetében, mint amilyen az élelmiszerellátásunk, vagy a tulajdon testünk. Bár a jelenlegi szabályozások számos esetben képesek kezelni a kockázatokat, a legfőbb ok az aggodalomra az, hogy a fel nem derített kölcsönhatások igen széles skálájáról fogalmunk sincsen.

Ennek ellenére több száz, az ipari folyamatok javítását célzó projektben kezdték már el használni a nanotechnológiát. Többek között kifejezetten arra is, hogy a már meglévő szennyezéstípusok ellen felvegyék a harcot. Pár példa:

- Széles körben kutatják, hogy a nanorészecskéket miként lehetne felhasználni a környezetbe jutott különféle mérgező anyagok kezelésére, semlegesítésére és eltávolítására. Az oxidálószerkezetek, redukálószerkezetek és egyéb aktív anyagok nanorészecskés formái ígéreteseknek tűnnek, mivel igen sokféle nemkívánatos anyagot képesek lehetnek átalakítani. A fényre aktiválódó nanorészecskék (például a titán-dioxid és a cink-oxid változatai) képesek megkötni és eltávolítani szerves mérgeket, és önmagukban csak kevésbé mérgezőek.^[476] A cink-oxid nanorészecskék kiemelten erős katalizátornak bizonyultak a

klórozott fenolok ártalmatlanításában. Ezek a nanorészecskék érzékelőként és katalizátorokként is működnek, és meg lehet tervezni őket úgy, hogy csak a célzott szennyező anyagot alakítsák át.

- A nanoszűrős víztisztító hártványok drámaian nagyobb hatékonysággal képesek kiszűrni az apró szennyező részecskéket a vízülepítő medencékkel és szennyvíztisztító anyagokkal dolgozó hagyományos módszereknél. A tervezett katalízisű nanorészecskék magukba tudják szívni és el tudják távolítani a szennyeződések. A mágneses elválasztás segítségével aztán ezek a nanoanyagok újra felhasználhatóak lesznek, tehát nem válnak szennyező anyaggá. A számos példa közül vegyük szemügyre a nanoméretű alumínium-szilikátos (zeolitos) molekuláris szitákat, melyeket a szénhidrogének kontrollált oxidálására fejlesztenek ki! (Például az eljárást, amely a toluént nem mérgező benzaldehiddé alakítaná.)^[477] Ez a módszer kevesebb energiát igényel, továbbá lecsökkenti a kevésbé hatékony fotoreakciók és a keletkező hulladék mennyiségét.

- Széles körű vegyipari kutatások folynak katalizátornak és katalizátortámogatónak alkalmas nanotermelt kristályos anyagok kifejlesztésére. Ezek a katalizátorok növelhetnék a kémiai előállítás hatásfokát, csökkenthetnék a mérgező melléktermékek mennyiségét, és eltávolíthatnák a szennyeződések.^[478] Például az MCM-41 nevű anyagot az olajiparban az olyan ultrafinom szennyeződések eltávolítására használják, melyeket a többi szennyeződéscsökkentő módszer nem vesz észre.

- Becslések szerint a nanokompozitok szerkezeti anyagként való széles körű felhasználása az autókban évente 1,5 milliárd literrel csökkenthetné a benzinfogyasztást, ami évente akár ötmilliárd kilóval mérsékelhetné a szén-dioxid-kibocsátást más, környezetileg hasznos tulajdonsága mellett.

- A nanorobotika a nukleáris hulladék kezelésében is segítségünkre lehet. A nanoszűrők a nukleáris tüzelőanyag kezelésekor szétválaszthatják az izotópokat. A nanofolyadékok javíthatják a nukleáris reaktorok hűtésének hatékonyságát.

- A nanotechnológia alkalmazása az otthoni és az ipari világításban csökkentheti az elektromos áram felhasználását, és becslések szerint éves szintén mintegy kétszázmillió tonnával a széndioxid-kibocsátást is.^[479]

- Az önösszeállító elektromos készülékek (például az önelrendező biopolimerek) tökéletesítésével kevesebb energiát emésztene fel a gyártásuk, és kevesebb mérgező melléktermékkel járna, mint a hagyományos félvezető-gyártási módszerek.

- Az új, nanocsőalapú téremissziós kijelzőket (*field-emission display-t*, FED) használó új számítógépes monitorok sokkal jobb tulajdonságaik mellett kiküszöbölnék a hagyományos kijelzőkre jellemző nehézfémek és egyéb mérgező anyagok felhasználását.

- A kétfémes nanorészecskék (például a vas/palládium vagy a vas/ezüst) hatékony redukálószeres és katalizátorok lehetnek a poliklórozott bifenilek, a rovarirtószeres és a halogénezett szerves oldószeres esetében.^[480]

- A nanocsövek hatékony dioxinelnyelőnek tűnnek, és lényegesen jobb teljesítményt nyújtottak e téren, mint a hagyományos aktív szén.^[481]

Ez csak egy kis mintavétel a potenciálisan környezetbarát hatású nanotechnikai alkalmazások kapcsán pillanatnyilag folyó kutatásokból. Ha képessé válunk továbblépni az egyszerű nanorészecskéken és nanorétegeken, és összetettebb rendszereket tudunk létrehozni az irányított molekuláris nano-összeállítással, nagyszámú apró, intelligens készüléket alkothatunk, melyek viszonylag összetett feladatok elvégzésére is képesek. A környezet megtisztítása egyértelműen ezek

Nanobotok a vérkeringésben

„A nanotechnológia eszközt adott a kezünkbe... hogy a természet végső játékkockáival, az atomokkal és a molekulákkal játszassunk. Minden ebből épül fel... Korlátatlannak tűnik az új dolgok létrehozásának lehetősége.”

(Horst Störmer Nobel-díjas kutató)

„A nanogyógyászati beavatkozások nettó hatása a biológiai öregedés minden aspektusának leállításával mellett kiterjed arra is, hogy a páciens testének adott biológiai állapotát – a „korát” – az általa kívánt új biológiai állapotra – „új életkorra” – cseréljük. Ezáltal elvágja a naptár szerint eltelt idő és a biológiai egészség közti kapcsolatot. Jó néhány évtized múlva mindennaposak lehetnek az efféle beavatkozások. Az éves vizsgálatok és tisztítókérek, és néhány nagyobb javítás elég lesz ahhoz, hogy a biológiai korunkat évente egyszer visszaállítsák arra a nagyjából azonos fiziológiai korra, amit választunk. Persze balesetben még mindig meghalhatunk, de legalább tízszer olyan hosszú ideig élünk majd, mint jelenleg.”

(Robert A. Freitas Jr.)^[482]

A gyártásban tapasztalható precíz molekuláris irányításra az egyik legjobb példa a több milliárd nanobot munkába állítása. A parányi robotok akkorák, mint az emberi vörösvérsejtek, vagy még kisebbek, és a véráramban közlekedhetnek. Ez az elképzelés nem olyan futurisztikus, mint elsőre hinnénk: a koncepció már túl van a sikeres állatkísérleteken, és számos hasonlóan mikroméretű készülék működik már állatokban. A BioMEMS (biológiai mikroelektronikai-mechanikus rendszerek) témájában már legalább négy nagyobb konferencia foglalkozott az emberi véráramban használható készülékekkel.^[483]

Gondoljunk a nanobot-technológia megannyi példájára, amelyek a miniatürizációt és a költségcsökkentési trendeket alapul véve úgy huszonöt éven belül megvalósulhatnak! Amellett, hogy az emberi agy vizsgálatával talán sikerül megfejtenünk a felépítését és működését, a nanobotokat sokféle diagnosztikai és terápiás célra is használhatjuk.

Robert A. Freitas Jr., a nanotechnológia elméletének egyik úttörője és a nanogyógyászat (azaz a biológiai rendszereink molekuláris méretű konstrukciók segítségével történő átkonfigurálása) egyik fő támogatója és az azonos című könyv szerzője^[484] olyan robotokat tervezett, melyek lecserélhetnék az emberi vörösvérsejteket, és több százszor vagy több ezerszer hatékonyabbak lehetnének biológiai megfelelőiknél. Freitas respirocitái (robotvörösvérsejteik) segítségével egy futó lélegzetvétel nélkül tizenöt percen át bírná az olimpiai sprintet.^[485] Freitas robotmakrofágjai, a „mikrobafalók”, a saját fehérvérsejtjeinknél sokkal hatékonyabban vennék fel a küzdelmet a kórokozók ellen.^[486] DNS-javító robotjai képesek lennének kijavítani a DNS-másolási hibákat, vagy esetleg szükség szerint megváltoztatni a DNS-t. Felvetett más gyógyászati robotokat is, amelyek tisztítanának, eltávolítanának a nemkívánatos szemetet és vegyületeket (például a prionokat, a torzult fehérjéket és a protofibrillumokat) az egyes emberi sejtekből.

Freitas számos különböző gyógyászati nanorobot (ő maga ezt a kifejezést részesíti előnyben) részletes koncepcionális tervét vázolta fel, és jó néhány megoldást is csatolt hozzájuk a létrehozataluk kapcsán felmerülő különféle tervezési nehézségek leküzdésére. Például vagy egy tucat megközelítést

javasol az irányított mozgás megoldására,^[487] ezek némelyike olyan biológiai példákat vesz alapul, mint a csillószőrök. Ezekről az alkalmazásokról bővebben írok még a következő fejezetben.

George Whiteside arról panaszkodott a *Scientific American* lapjain, hogy „még ha készíteni is tudnánk a nanoméretű tárgyaknak propellert, akkor is új és komoly problémával kellene szembenéznünk: azzal, hogy véletlenszerűen nekiütközik egy vízmolekulának. Ezek a vízmolekulák kisebbek lennének ugyan a nano-tengeralattjárónknál, de nem sokkal”.^[488] Whiteside elemzése alapvető félreértésből származik. Minden gyógyászati nanobotterv, beleértve Freitas terveit is, legalább tízezerszer akkora, mint egy vízmolekula. Freitas és mások elemzése kimutatták, hogy a környező molekulák Brown-mozgásának hatása nem lenne jelentős. A nanoméretű gyógyászati robotok valójában tízezerszer stabilabbak és pontosabbak lennének a vérsejtekénél és a baktériumoknál.^[489] Érdekes azt is megjegyezni, hogy a gyógyászati nanobotoknak nem lenne szükségük kiterjedt biológiai sejthálózatra, hogy fenntartsanak olyan anyagcserés folyamatokat, mint az emésztés vagy a lélegzés. Nem lenne szükségük biológiai reprodukciós rendszerekre sem.

Bár Freitas koncepcióit még pár évtizedig nem tudjuk megvalósítani, máris jelentős előrelépések történtek a véráramba juttatható készülékek terén. A chicagói Illinois-i Egyetem kutatói például patkányokban sikeresen gyógyították az 1-es típusú cukorbetegséget hasnyálmirigy-szigetsejteket tartalmazó, nanotervezett gépezettel.^[490] A készüléken hét nanométer átmérőjű pórusok engedik ki az inzulint, de nem engedik be azokat az antitesteket, amelyek elpusztítanák az inzulint termelő sejtet. Számos hasonló típusú innovatív projekten is dolgoznak még.

MOLLY 2004: *Oké, szóval ott lesz ez a rengeteg nanobot a vérkeringésemben. Most akkor azon kívül, hogy órákon át ülhetek a medence alján, mire is jó ez nekem?*

RAY: *Megőrzi az egészségedet. Elpusztítják a kórokozókat: a baktériumokat, a vírusokat, a rákos sejteket, és nem esnek az immunrendszer számos csapdáinak egyikébe sem, például nem váltanak ki autoimmun-reakciót. A biológiai immunrendszereddel ellentétben ezeknek megmondhatod, ha nem tetszik, amit csinálnak.*

MOLLY 2004: *Mármint e-mailezhetek a nanobotjaimnak? Hogy helló, nanobotocskák, ne pusztítsátok már el a baktériumokat a bélrendszeremben, mert igazából azok jót tesznek az emésztésemnek?*

RAY: *Igen, ez jó példa. Te irányítod majd a nanobotjaidat. Kommunikálnak egymással és az internettel. Már ma is vannak idegi implantátumok, például a Parkinson-kórra, amelyek megengedik, hogy a beteg új szoftvert töltsön le rájuk.*

MOLLY 2004: *Ez kicsit súlyosbítja az egész szoftvervírus dolgot is, nem? Most, ha bekapok egy durva szoftveres vírust, le kell futtatnom egy vírusirtó programot, és fel kell töltenem a fájljaimról a biztonsági mentést, de ha a vérkeringésemben lévő nanobotok rossz üzenetet kapnak, elkezdhetik elpusztítani a saját vérsejtjeimet...*

RAY: *Ez is csak újabb ok arra, hogy miért dönts inkább robotvérsejtek mellett, de értem, mire akarsz kilyukadni. Ám ez nem új keletű probléma. Már most 2004-ben is léteznek olyan kritikus szerepet betöltő szoftveres rendszerek, amelyek intenzív osztályokat látnak el, a sürgősségi szolgálatok rendszerét irányítják, atomerőműveket vezérelnek, repülőgépeket tesznek le a földre, és rakétákat irányítanak. A szoftverbiztonság tehát már most is elengedhetetlen.*

MOLLY 2004: *Igen, de valahogy sokkal aggasztóbbnak tűnik, hogy a testemben és az agyamban fusson egy szoftver. A saját személyi számítógépemen naponta száznál is több spam*

üzenetet kapok, és ebből jó néhányban kártékony vírusok rejlenek. Nem tartom megnyugtatónak, hogy a testemben lévő nanobotokat is megfertőzheti egy szoftveres vírus...

RAY: Úgy gondolsz rá, mint a hagyományos internetelésre. A VPN-ekkel, azaz a privát hálózatokkal már ma is képesek vagyunk biztonságos tűzfalak létrehozására, máskülönben képtelenség lett volna megalkotni ezeket a kritikus fontosságú rendszereket. Meglehetősen jól működnek, és az internet biztonsági technológiái is fejlődni fognak.

MOLLY 2004: Azt hiszem, nem mindenki értene egyet azzal, hogy ennyire bízol a tűzfalakban.

RAY: Valóban nem tökéletesek, és soha nem is lesznek azok, de még jó néhány évtized kell ahhoz, hogy kiterjedt szoftverek fussanak a testünkben és az agyunkban.

MOLLY 2004: Oké, de addig a vírusírók is tökéletesítik a mesterségüket!

RAY: Feszült szembenállás lesz, az biztos. De a rendszer ma is láthatóan több előnnyel jár, mint kárral.

MOLLY 2004: Ez miből is látszik?

RAY: Például senki sem jön azzal, hogy be kéne zárnunk az internetet, mert a szoftvervírusok annyi problémát okoznak.

MOLLY 2004: Ebben igazad van.

RAY: Ha a nanotechnológia beérett, képes lesz megoldani a biológia problémáit azzal, hogy legyőzi a biológiai kórokozókat, elpusztítja a mérgeanyagokat, kijavítja a DNS hibáit, és visszafordítja az öregedés egyéb forrásait. Szembe kell majd néznünk persze azokkal az új veszélyforrásokkal, amelyeket magával hoz, ahogy az internet is magával hozta a szoftvervírusok kockázatát. Ezek közt az új problémák közt ott lesz az irányíthatatlanul szaporodó nanoeszközök veszélye is, nem csak a sokoldalú, egyenletes eloszlásban jelen lévő nanobotokat irányító szoftver biztonsága.

MOLLY 2004: Azt mondtad, visszafordítja az öregedést?

RAY: Látom, kezded megérteni az egyik legfőbb előnyt.

MOLLY 2004: Pontosan hogyan is csinálnák ezt a nanobotok?

RAY: Tulajdonképp a nagyját a biotechnológia fogja elérni olyan módszerekkel, mint az RNS-interferencia, ami lekapcsolja a romboló géneket; az egyének genetikai kódját megváltoztató génterápia; a sejtek és szövetek regenerálására kifejlesztett terápiás klónozás; az okos gyógyszerek, amelyek átprogramozzák az emberi anyagcsere szokásait; és számtalan más, fejlesztés alatt álló technika. De amit a biotechnológia esetleg nem tudna megoldani, azt képesek leszünk nanotechnológiával véghezvinni.

MOLLY 2004: Például?

RAY: A nanobotok a véráramban keringve ki-be juthatnak a sejtekbe, és számos feladatot elvégezhetnek, például eltávolíthatják a mérgeanyagokat, kitakaríthatják a szemetet, kijavíthatják a DNS-hibákat, megjavíthatják és helyreállíthatják a sejthártyákat, visszafordíthatják az ateroszklerózist, módosíthatják a hormonszintet, a neurotranszmittereket és az anyagcsere egyéb fontos vegyületeit, és végrehajthatnak számtalan más feladatot is. Az öregedés minden egyes folyamatára fel tudunk állítani olyan nanobotprotokollt, amely visszafordíthatja az adott folyamatot az egyes sejtek, a sejtrészek, a molekulák szintjén.

MOLLY 2004: Tehát akár a végtelenségig fiatalok maradhatunk?

RAY: *Pontosan.*

MOLLY 2004: *Mit mondtál, mikor is kaphatom meg?*

RAY: *Azt hittem, aggódsz a nanobottűzfal miatt!*

MOLLY 2004: *Persze, persze, de ráérek azon aggódni, nem? Szóval mennyit kell még erre várnom?*

RAY: *Úgy húsz-huszonöt évet.*

MOLLY 2004: *Most huszonöt vagyok, szóval akkor nagyjából negyvenöt leszek, és annyi is maradok?*

RAY: *Nem egészen. Drasztikusan lelassíthatod az öregedést már azzal is, amit most tudunk. Tíz-húsz éven belül a biotechnológiai forradalom jóval tovább lassíthat, és számos esetben vissza is fordíthat egyes betegségeket és öregedési folyamatokat. Szó sincs róla, hogy közben sem történik semmi! Évről évre jobb technikáink lesznek, és gyorsul a folyamat. Aztán a nanotechnológia befejezi a munkát.*

MOLLY 2004: *Persze, persze, neked nehezedre is esne befejezni egy mondatot a „gyorsul” szó használata nélkül. Szóval mi is lesz a biológiai korom, mire odáig jutunk?*

RAY: *Szerintem valahol a harmincas éveidben jársz majd, és egy időre ott is maradsz.*

MOLLY 2004: *A harmincas éveim egész jól hangzanak. Azt hiszem, amúgy is jó lenne kicsit érettebbnek lenni ennél a huszonötötnél. De mit értesz az alatt, hogy „egy időre”?*

RAY: *A megállítás és a visszafordítás csak az út eleje. A nanobotok segítségével elért egészség és a hosszú élet csak a kezdeti fázisa annak, hogy a nanotechnológia és az intelligens számítástechnika bekerül a testünkbe és az agyunkba is. Jóval komolyabb hatást gyakorol majd ránk az, hogy miképp javítjuk fel a gondolkodás folyamatát az egymással és a biológiai neuronokkal is kommunikálni képes nanobotokkal. Ha a nem biológiai intelligencia megtapad, úgymond, az agyunkban, alkalmazható lesz rá a gyorsuló megtérülés törvénye, és mindez exponenciálisan bővül. A biológiai gondolkodásunk ezzel ellentétben egy szinten stagnál.*

MOLLY 2004: *Már megint a gyorsulásról beszélsz, de ha ez valóban beindul, akkor a biológiai neuronokkal végzett gondolkodás elég triviálisnak tűnhet mellette...*

RAY: *Helyes észrevétel.*

MOLLY 2004: *Tehát a jövő Miss Mollyja mikor is dobja el a biológiai testét és agyát?*

MOLLY 2104: *Ugye nem szeretnéd, hogy előre eláruljam, mi történik veled a jövőben? Különben is, ez nem teljesen pontos kérdés.*

MOLLY 2004: *Miért is nem?*

MOLLY 2104: *A 2040-es években kifejlesztettük a módszert arra is, hogy azonnal alkossunk, akár biológiai, akár nem biológiai részeket magunkból. Egyre inkább egyértelművé vált, hogy a valódi természetünk információmintázat, de ennek ellenére meg kellett valahogy jelennünk fizikai formában is. Ám ezt a fizikai formát könnyedén váltogathattuk.*

MOLLY 2004: *Hogyan?*

MOLLY 2104: *Az új, nagy sebességű MNT-gyártás segítségével könnyen és gyorsan áttervezhettük a fizikai megjelenésünket. Lehetséggé vált, hogy egyszer legyen biológiai testem, egyszer ne, aztán megint igen, majd azt megváltoztassam és így tovább.*

MOLLY 2004: *Azt hiszem, követem a dolgot.*

MOLLY 2104: *Az a lényeg, hogy kedvem szerint választhattam: van-e biológiai agyam*

és/vagy testem, vagy nincs. Szó sincs olyasmiről, hogy végleg eldobnánk akármit is, visszavehetünk bármit, amit eldobtunk.

MOLLY 2004: Még mindig csinálsz ilyesmit?

MOLLY 2104: Van, aki még mindig csinálja, de 2104-ben kicsit már idejétmúlt. Úgy értem, a szimulált biológia teljességgel megkülönböztethetetlen a valódi biológiától, szóval miért vacakoljunk a fizikai példányosulással?

MOLLY 2004: Aha, csak vacakol vele az ember, mi?

MOLLY 2104: Pontosan.

MOLLY 2004: Azért azt meg kell hagyni, furcsa lehet, ha az ember meg tudja változtatni a fizikai megtestesülését. Mármint akkor hol a te... az én... folyamatosságom?

MOLLY 2104: Ugyanott, ahol 2004-ben volt. Így is folyamatosan változnak a részecskéid, nem? Csak az információs mintázatodban van folyamatosság.

MOLLY 2004: De 2104-ben az információs mintázatodat is könnyen meg tudod változtatni. Én erre nem vagyok képes.

MOLLY 2104: Valójában nem olyan más ez sem. Te is változtatsz a mintázatodon, a memóriádon, a tudásodon, a tapasztalataidon, idővel még a személyiségeden is, de ott a folytonosság, mert az egész magja csak fokozatosan változik.

MOLLY 2004: De azt hittem, egyik pillanatról a másikra drámaian meg tudod változtatni a külsődet és a személyiségedet is.

MOLLY 2104: Igen, de ezek csak felszíni változások. Az igazi magvam csak lassan változik, épp úgy, ahogy akkor tette, amikor még te voltam 2004-ben.

MOLLY 2004: Nem mondom, sokszor örülnék neki, ha azonnal megváltoztathatnám a felszíni megjelenésemet!

Robotika: erős mesterséges intelligencia

„Vegyük Turing egy másik állítását! Eddig csak viszonylag egyszerű és kiszámítható készülékeket építettünk. Amikor növeljük gépeink komplexitását, érhetnek minket meglepetések.

Turing a hasadóanyagok példáját említi. Ahogy egyre nagyobb kupac hasadóanyagot halmozunk egymásra, egy adott »kritikus« méret alatt semmi különös nem történik, de afölött hirtelen beindul a nemulass. Talán így van ez az agyakkal és a gépekkel is. A legtöbb emberi agy és gép jelenleg a kritikus tömeg alatti („szubkritikus”) – nehézkesen és érdektelen módon reagálnak a bejövő ingerekre, nincsenek saját ötleteik, csak jól ismert válaszokat képesek adni –, de néhány jelenlegi agy a kritikus szint felett van, és a saját minőségében sziporkázik – ahogy talán a jövőben néhány gépre is jellemző lesz ez. Turing azt akarja mondani, hogy az egész csak komplexitás kérdése, és hogy egy bizonyos komplexitási szint felett minőségi ugrás történik: a kritikus szintet elérő gépek egészen mások lesznek az eddig elképzelt, egyszerű masináknál.”

(J. R. Lucas, oxfordi filozófus 1961-es „Elmék, gépek és Gödel” című esszéjében)^[491]

„Amennyiben a szuperintelligencia egy nap elképzelhetővé válik, az a kérdés, hogy az emberek ki akarják-e majd fejleszteni. A kérdésre adott válasz szinte bizonyosan igen. A

szuperintelligenciához vezető minden lépés hatalmas gazdasági haszonnal kecsegtet. A számítógépipar hatalmas összegeket ruház be a hardverek és szoftverek következő generációiba, és ezt meg is teszi egészen addig, amíg versenyhelyzetbe van kényszerítve és profitot termelhet. Az emberek jobb gépekre és okosabb szoftverre vágnak, és élni akarnak az ezen gépek által létrehozott előnyökkel. Jobb orvosságokkal, az emberek felszabadításával az unalmas vagy veszélyes munkák alól, a szórakozással – se vége, se hossza a fogyasztói előnyöknek. A mesterséges intelligencia fejlesztése mögött erős katonai indíték is húzódik. És az úton sehol sem találunk olyan természetes pontot, ahol azt kellene mondanunk, »eddig és ne tovább!«, ahogyan a technofóbiások állítják.”

(Nick Bostrom, „Mikor jön el a szuperintelligencia?”, 1997)

„Nehéz elképzelni olyan problémát, amelyet egy szuperintelligencia ne tudna megoldani, vagy legalábbis ne tudna segíteni a megoldásában. A betegség, szegénység, környezetszennyezés, mindenféle felesleges szenvedés mind olyan dolgok, amelyeket egy fejlett nanotechnológiával ellátott szuperintelligencia képes eltörölni. Továbbá egy szuperintelligencia végtelen élettartamot biztosíthat nekünk: vagy az öregedés nano-orvostudomány általi megállításával és visszafordításával, vagy a lehetőség által, hogy feltölthetjük magunkat. Egy szuperintelligencia lehetőségeket nyújthat nekünk arra, hogy nagyban megnöveljük intellektuális és érzelmi képességeinket, és segíthet megteremteni egy nekünk tetsző tapasztalati világot, amelyben életünket boldog játéknak, az egymással való viszonyainknak és tapasztalásainknak, a személyes fejlődésünknek és ideáljaink elérésének szentelhetjük.”

(Nick Bostrom, „A fejlett mesterséges intelligenciával kapcsolatban felmerülő etikai kérdések”, 2003)

„A robotoké lesz a Föld? Igen, de a robotok a mi gyermekeink lesznek.”

(Marvin Minsky, 1995)

A szingularitás mögött húzódó három alapvető forradalom („G”, „N” és „R”) közül a legnagyobb jelentőségű az „R”, ami a felerősített embereket meghaladó nem biológiai intelligencia megszületésére utal. Az intelligensebb folyamatok lényegében legyőzik a kevésbé intelligenst, az intelligenciát téve meg az univerzum leghatalmasabb vezérelvének.

Míg a GNR „R”-je a robotikát jelenti, a valódi kérdés az erős mesterséges intelligencia (az emberi intelligenciát meghaladó intelligencia) létrejötte. A robotika hangsúlyozása csak azért érdekes, mert az intelligenciámnak testre is szüksége van, egy fizikai jelenlétre ahhoz, hogy kapcsolatba léphessen a világgal. Nem értek egyet azonban a fizikai jelenlét hangsúlyozásával, mert úgy hiszem, a központi probléma az intelligencia. Az intelligencia végül így vagy úgy hatással lesz a világra, beleértve azt, hogy megteremti saját módszereit a megtestesülésre és fizikai manipulációra. Továbbá a fizikai képességeket intelligenciánk alapvető részéhez sorolhatjuk; az emberi agy nagy része például (a kisagy, amely neuronjaink több mint felét tartalmazza) fizikai képességeink és izmaink irányításával van elfoglalva.

Az emberi szintű mesterséges intelligencia több okból is szükségszerűen nagyban meghaladja majd az emberi intelligenciát. Mint már korábban felhívtam rá a figyelmet, a gépek képesek azonnali ismeretmegosztásra. Mi, tovább nem fejlesztett emberek, nem tudjuk megosztani a tudásunkat, ismereteinket és képességeinket alkotó idegsejtek közötti kapcsolataink és ingerületátvivő anyagaink

szerteágazó mintáit, hacsak nem a lassú nyelvi kommunikáció útján. Persze még ez a módszer is rendkívül hasznos, mivel megkülönböztetett minket az állatoktól, és ez tette lehetővé a technológia megszületését.

Az emberi képességek csak olyan módokon fejlődhetnek, amelyek evolúciós támogatást nyernek. Azok a képességek, amelyek elsősorban masszívan párhuzamos mintafelismerésre alapulnak, kiváló eredményeket biztosítanak bizonyos feladatokban, mint az arcfelismerésben, tárgyak azonosításában és a nyelvi hangok megismerésében. De nem előnyösek mások esetén, például pénzügyi adatok mintáinak meghatározásában. Ha egyszer teljes mértékben megtanuljuk kezelni a mintafelismerési paradigmákat, a gépi módszerek alkalmazhatják ezeket a technikákat akármilyen mintatípusra.^[492]

A gépek olyan módokon tudják egyesíteni az erőforrásaikat, ahogyan az emberek nem képesek rá. Bár emberek csoportjai képesek olyan mind fizikai, mind mentális tettekre, amelyekre egyénenként nem, a gépek könnyebben és gyorsabban akkumulálják számítástechnikai, memória- és kommunikációs erőforrásaikat. Mint már korábban is tárgyaltam, az internet a számítási erőforrások egész világot átérő hálójává fejlődik, amelyet azonnal egyesíteni lehet masszív szuperkomputerek létrehozásához.

A gépeknek kérlelhetetlenül pontos memóriájuk van. A mai számítógépek több milliárd tényt tudnak pontosan kezelni, és ez a képesség minden évben megduplázódik.^[493] A számítástechnika általános sebessége és ár-teljesítmény-aránya is évente hasonló ütemben javul, és a megkettőződés mértéke is gyorsul.

Az emberi tudás webre való vándorlásával a gépek képesek lesznek elolvasni, megérteni és összegezni minden emberi-gépi információt. A biológiai emberek utoljára több száz évvel ezelőtt voltak képesek egyénileg befogadni az emberi tudományos ismeretek összességét.

A gépi intelligencia másik előnye az, hogy konzekvensen és a csúcson teljesít, és képes a csúcsképességeket kombinálni. Az emberek közül egy személy mesteri módon szerez zenét, míg a másik a tranzisztortervezéshez ért, de az emberi agy merev architektúráját tekintve nincsen kapacitásunk (vagy időnk) minden, egyre inkább specializálódó területen a legmagasabb szintű képességet kifejleszteni és alkalmazni. Az emberek ezen túl az adott képességek tekintetében is nagyban különböznek, így hát, amikor mondjuk az emberi zeneszerzőkről beszélünk, Beethovenre vagy egy átlagemberre gondolunk? A nem biológiai intelligencia képes lesz elérni és meghaladni az emberi képességek csúcsát az élet minden területén.

Ezekből az okokból kifolyólag, ha egy számítógép egyszer képes lesz reprodukálni az emberi intelligencia kifinomultságát és széles tartományát, szükségszerűen túl is szárnyalja majd azt, és folytatja hatványozottan exponenciális emelkedését.

A szingularitással kapcsolatos alapvető kérdés az, hogy vajon a „tyúk” (erős mesterséges intelligencia) vagy a „tojás” (nanotechnológia) jön-e először. Más szóval az erős mesterséges intelligencia teljes nanotechnológiához vezet majd (molekuláris összeszerelők formájában, amelyek az információt fizikai terméké alakítják), vagy a teljes nanotechnológiából következik majd az erős mesterséges intelligencia? Az első elképzelés logikája azon alapszik, hogy az erős mesterséges intelligencia emberfeletti mesterséges intelligenciával jár együtt a fenti okok miatt, és az emberfeletti mesterséges intelligencia olyan helyzetbe kerül, ahol megoldhatja az összes fennmaradó mérnöki problémát, amelyek gátolják a teljes nanotechnológia megszületését.

A második elképzelés azon a felismerésen alapul, hogy az erős mesterséges intelligencia hardverkövetelményeit a nanotechnológiai alapú számítástechnika tudja majd kielégíteni. Így a szoftveres követelményeket is nanobotok teljesítik majd, amelyek nagy felbontású felvételeket

készíthetnek majd az emberi agy működéséről, és befejezhetjük az emberi agy mérnöki visszafejtését.

Mindkét előfeltevés logikus, és nyilvánvaló, hogy mindkét technológia segíthet a másiknak. A valóság az, hogy mindkét fejlesztési terület szükségszerűen kihasználja majd a legfejlettebb eszközeinket, így az egyes területek fejlesztése egyidejűleg gerjeszti a másikat is.

Azonban azt hiszem, hogy a teljes MNT (molekuláris nanotechnológia) az erős mesterséges intelligencia előtt fog megszületni, habár csak néhány évvel (a nanotechnológia 2025 körül, az erős mesterséges intelligencia 2029 körül).

Amilyen forradalmi lesz a nanotechnológia, az erős mesterséges intelligencia sokkal mélyrehatóbb következményekkel jár majd.

A nanotechnológia nagy hatású terület, de nem feltétlenül intelligens. Tudunk olyan megoldásokat tervezni, melyek legalább kezelhetik a nanotechnológia hatalmas lehetőségeit, de a szuperintelligenciát nem tudjuk belülről irányítani.

Az elszabadult MI. Ha egyszer megszületik az erős mesterséges intelligencia, azonnal továbbfejleszhető lesz, és képességei megsokszorozhatóak, hiszen ilyen a gépi képességek alapvető természete. Amint az egyik erős MI elkezd sok másik mesterséges intelligenciát gyártani, az utóbbiak már képesek lesznek megérteni és továbbfejleszteni a saját felépítésüket, és így gyorsan egy sokkal nagyobb kapacitású, sokkal intelligensebb mesterséges intelligenciává fejlődni, és ez a körforgás akármeddig folytatódhat. Az egyes ciklusok nemcsak hogy egy sokkal intelligensebb mesterséges intelligenciát hoznak létre, de mind kevesebb időbe kerülnek majd, mint az azt megelőző ciklusok, ahogy az már a technológiai evolúciónál (vagy bármilyen evolúciós folyamatnál) lenni szokott. Egyesek azt jósolják, hogy ha egyszer az erős MI megszületik, azonnal elszabadul, és a sebesen fejlődő szuperintelligencia gyorsvonata elhúz a messzeségbe. ^[494]

A saját elképzelésem egy kissé különbözik ettől. Az elszabadult mesterséges intelligencia logikája legitim elképzelés, ám át kell gondolnunk az időkereteket!

A gondolkodás emberi szintjének elérése nem fog azon nyomban létrehozni egy ilyen láncát letépett jelenséget. Vegyük azt, hogy az intelligencia emberi szintjének megvannak a maga korlátai. Erre most is találunk példát – körülbelül hatmilliárdot. Képzeljünk el egy olyan forgatókönyvet, amelyben kiveszünk száz embert egy bevásárlóközpontból! Ez a csoport viszonylagosan képzett és tanult emberek mintacsoportja. Ám ha ezt a csoportot azzal a feladattal bízánk meg, hogy fejlesszék tovább az emberi intelligenciát, nem jutnának túl messzire, még ha segítségül meg is kapnák az emberi intelligencia sablonjait. Valószínűleg még egy egyszerű számítógépet is nehezen hoznának össze. A száz ember gondolkodásának felgyorsítása és memóriakapacitásuk megnövelése sem oldaná meg azonnal a problémát.

Már fentebb kifejtettem, hogy a gépek minden területen elérik (és gyorsan meg is haladják) az emberi képességek csúcsát. Ezért az előző példa helyett vegyünk száz tudóst és mérnököt! Egy megfelelő háttérrel rendelkező, szakmailag képzett ember képes volna fejleszteni a meglévő felépítést. Ha egy gép száz (majd ezer, aztán végül egymillió) műszakilag képzett embernek megfelelő intelligenciát ér el, és a biológiai embereknél sokkal gyorsabban fejlődik, az az intelligencia egyre sebesebb változását vonná maga után.

Azonban ez a felgyorsult fejlődés nem jön létre azonnal, amint egy számítógép átmegy a Turing-teszten. A Turing-teszt egy átlagos művelt ember képességeihez hasonlítható, és ezért közelebb áll a bevásárlóközpontos példánkban található emberekhez. A számítógépeknek időre lesz szükségük ahhoz, hogy minden apró képességet megtanuljanak, és hogy ezeket párosítsák a megfelelő

tudásbázisokkal.

Amint megalkotjuk az első gépet, amely átmegy a Turing-teszten (2029 körül), az azt követő időszak a konszolidációról fog szólni, amikor is a nem biológiai intelligencia sebes fejlődésbe kezd. Azonban a szingularitással járó soha nem látott expanzió, amelyben az emberi intelligencia megmilliárdszorozódik, nem történik meg a 2040-es évek közepéig (lásd a harmadik fejezetet).

A mesterséges intelligencia tele

„Létezik az az ostoba mítosz, hogy a mesterséges intelligencia megbukott, pedig a mesterséges intelligencia a nap minden másodpercében körülvesz bennünket. Egyszerűen csak nem vesszük észre. MI-rendszereket találunk az autókban – ezek hangolják az üzemanyag-befecskendezés paramétereit. Amikor egy repülőgéppel leszállunk, a megfelelő kaput egy forgalomszervező mesterségesintelligencia-rendszer választja ki. Mindig, amikor egy Microsoft szoftvert használunk, egy MI-rendszer próbálja kitalálni, mit csinálunk, mint például a levélírás esetén, és egészen kiváló munkát végez. Mindig, amikor megnézünk egy filmet számítógép-animációs karakterekkel, azok a figurák csoportként viselkedő mesterséges intelligenciák. Minden esetben, amikor videójátékkal játszunk, egy MI-rendszer ellen játszunk.”

(Rodney Brooks,

az MIT Mesterséges Intelligencia Laboratóriumának igazgatója)^[495]

Mindig találkozom olyanokkal, akik szerint a mesterséges intelligencia elenyészett az 1980-as években. Ez az állítás olyan, mintha valaki kötné az ebet a karóhoz, miszerint az internet elpusztult a 2000-es évek elejének dotcom válságában.^[496] Az internetes technológiák sávszélessége és ár-teljesítmény-aránya, a noduszok (szerverek) száma és az elektronikus kereskedelem dollárvolumene mind simán átvészelte a válságot, és továbbfejlődött és fejlődik azóta is. Ugyanez igaz a mesterséges intelligenciára.

A paradigmaváltások technológiai robbanásának ciklusa – a vasút, a mesterséges intelligencia, az internet, a telekommunikáció, és most talán a nanotechnológia esetében is – tipikusan az irreális elvárások időszakával kezdődik, amelyek a fejlődést lehetővé tevő tényezők hiányos ismeretéből következnek. Bár az új paradigma felhasználása exponenciálisan növekszik, a korai szakaszban lassan fejlődik, míg el nem éri az exponenciális fejlődési görbe közepét. Míg a forradalmi változásokra vonatkozó várakozások helytállóak, azok időzítése tévedhet. Amikor a jóslatok nem válnak be gyorsan, elérkezik a kiábrándultság időszaka. Ám az exponenciális növekedés töretlenül folytatódik, és évekkel később kezdetét veszi egy érettebb és a valóságnak inkább megfelelő átalakulás.

Ugyanezt láttuk a XIX. század vasúti örületénél is, amelyet a gazdasági csődök széles hulláma követett. (Történelmi dokumentumgyűjteményemben magam is őrzök néhány ilyen korai, kifizetetlen vasúti kötvényt.) És még mindig érezzük az e-kereskedelem és távközlés évekkel ezelőtt beállt válságait, amelyek recesszióiból csak most lábalunk ki.

A mesterséges intelligencia történetében is hasonló korai optimizmus serkent az olyan programok megszületése nyomán, mint Allen Newell, J. C. Shaw és Herbert Simon 1957-es Általános Problémamegoldója, amely képes volt bizonyításokat találni a Bertrand Russellt és más matematikusokat is zavarba ejtő tételekre, és az MIT Mesterséges Intelligencia Laboratóriumának első programjai, amelyek egyetemi (például analógiákkal és narratív problémákkal kapcsolatos) felvételi kérdésekre válaszoltak egyetemi hallgatók szintjén.^[497] A mesterségesintelligencia-vállalatok robbanásszerű elterjedése az 1970-es években kezdődött, ám amikor nem termeltek profitot, az 1980-

as években láthattuk a mesterséges intelligencia „válságát”, amit később a „mesterséges intelligencia telének” neveztek el. Több történész is úgy gondolja, hogy a mesterséges intelligencia telével a történet véget ért, és a terület azóta semmilyen új eredménnyel nem jelentkezett.

Am a mesterségesintelligencia-alkalmazások minden iparág infrastruktúrájában gyökeresen jelen vannak. A legtöbb ilyen program kutatási projektként indult tíz-tizenöt évvel ezelőtt. Amikor az emberek azt kérdezik: „mi a fene történt a mesterséges intelligenciával?”, az arra emlékeztet, amikor az esőerdőben utazó turisták eltűnődnek, „vajon hol van az a sok faj, ami állítólag itt él?”, miközben a flóra és fauna több száz faja kéznyújtásnyira éli világát, szervesen integrálódva a helyi ökológiába.

Már jócskán a „gyenge MI” korában járunk, amely a korábban emberi intelligenciát igénylő, hasznos és specifikus feladatokat elvégző mesterséges intelligenciára utal, ami egyébként emberi vagy még magasabb szinteken végzi el ezeket a feladatokat. Gyakran a gyenge mesterségesintelligencia-rendszerek is nagyban meghaladják az emberi sebességet, és ugyanakkor lehetővé teszik több ezer változó együttes kezelését. A későbbiekben bemutatom a gyenge mesterséges intelligencia szerteágazó példáit.

A mesterséges intelligencia technológiai ciklusának időkerete (néhány évtizednyi növekvő lelkesedés, egy évtizednyi kiábrándultság, aztán a használat másfél évtizedes elterjedése és megerősödése) hosszadalmasnak tűnhet az internetes és távközlési ciklusok rövid időszakához képest (amelyek években és nem évtizedekben mérhetőek), de nem szabad elfelejtenünk két tényezőt. Először is, az internetes és távközlési ciklusok viszonylag nemrégiben történtek meg, így jobban érintette őket a paradigmaváltások felgyorsulása (lásd az első fejezetet). Az ilyen új keletű adopciós ciklusok (robbanás, válság és fellendülés) sokkal gyorsabban folynak le, mint azok, amelyek negyven éve kezdődtek el. Másodszor pedig, a mesterséges intelligencia forradalma az emberi civilizáció által tapasztalható átalakulások legsúlyosabbika, így később éri el az érettséget, mint a kevésbé komplex technológiák. Az emberi civilizáció, vagy akár az egész földi evolúció legfontosabb és legerősebb képességének, az intelligenciának a megszerzésére törekszik.

A technológia természetéből adódik, hogy először megpróbálunk megérteni valamit, aztán olyan rendszereket alkotunk, amelyek felnagyítják az adott jelenséget. Például a tudósok felfedezték a görbült felületek egyik eddig ismeretlen tulajdonságát, amit a Bernoulli-elvnek neveztek el: egy gáz (mint a levegő) sokkal gyorsabban közlekedik egy görbült, mint egy egyenes felületen. Így a görbült felületen a légnyomás alacsonyabb, mint egy egyenes felület fölött. Eme finom jelenség megfigyelésével és felnagyításával, a következmények számbavételével a mérnökök megalkották a repülést. Ha egyszer megértjük az intelligencia alapelveit, hasonló esélyünk lesz összpontosítani a kapcsolódó képességekre, és felnagyítani azokat.

Mint a negyedik fejezetben már átvettük, az emberi agy megértésének, modellezésének és szimulálásának minden vetülete felgyorsul: az agyleképezés ár–teljesítmény-aránya és időbeli-térbeli felbontása, az agyfunkcióval kapcsolatos adat és tudás felhalmozása, és az agy különböző területeire vonatkozó modellek és szimulációk kifinomultságának a növekedése.

Már van egy nagy hatású eszközkészletünk, ami a mesterségesintelligencia-kutatás eredményeképpen jött létre, és amit több évtizednyi fejlesztés csiszolt tovább. Az agy visszafejtéses projektje nagyban megerősíti majd ezt az eszközkészletet, és közben új, biológiailag ihletett és önszerveződő technikák arzenálját alkotja meg. Végül majd képesek leszünk arra használni a mérnöki tudásunkat, hogy felerősítsük és meghaladjuk az emberi intelligencia száztrillió végtelenül lassú agyi kapcsolatát, amellyel ma mindannyian küzdünk. Ekkor majd az intelligencia teljesen a gyorsuló

megtérülések törvényének érvénye alá kerül, amely jelenleg évente megkettőzi az információs technológiák képességeit.

Az egyik alapvető probléma a mesterséges intelligenciával kapcsolatban, amit a kutatási területen eltöltött saját negyven évem során is tapasztaltam, az, hogy amint egy mesterségesintelligencia-megoldás működik, többé nem tekintik mesterséges intelligenciának, hanem új szakterületté ágazik el (például karakterfelismerés, beszédfelismerés, gépi látás, robotika, adatbányászat, orvosi informatika, automatizált befektetés).

A számítógéptudós Elaine Rich úgy határozza meg a mesterséges intelligenciát, mint „annak tudományát, miként lehet a számítógépeket rávenni olyan dolgokra, amelyekben az emberek egyelőre jobbak”. Rodney Brooks, az MIT Mesterséges Intelligencia Laboratóriumának igazgatója másképpen fogalmaz: „Mindig, amikor megértjük egy részét, az egész elveszíti a varázsát, és azt mondjuk: *ugyan már, hiszen ez csak számítástechnika!*” Ennek kapcsán Watson Sherlock Holmeshez intézett megjegyzése is eszembe jut: „Először azt hittem, valami ravasz trükk, de már látom, hogy nincs benne semmi különös”.^[498] Mesterségesintelligencia-tudósokként a mi tapasztalatunk is hasonló. Az intelligencia varázsa szinte „semmivé” satnyul, amikor teljesen megértjük a működését. További varázst csak az intelligencia eddig még nem ismert működései által kiváltott kíváncsiság képes generálni.

A mesterséges intelligencia eszköztára

„A mesterséges intelligencia olyan technikák tanulmányozása, amelyek exponenciálisan nehéz problémák polinomiális időben való megoldására irányulnak, a problémakörben szerzett ismereteink felhasználásával.”

(Elaine Rich)

Mint azt a 4. fejezetben is említettem, csak mostanában tudtunk megfelelően részletes modellt alkotni arról, hogyan működnek az agyterületek, és ezzel elősegíteni a mesterséges intelligencia tervezését. Azelőtt, a megfelelő nagyításokra képes agyfűrkész eszközök hiányában, a mesterségesintelligencia-tudósok csak a saját technikáikra hagyatkozhattak. Mint ahogy a repülőmérnökök sem a madarak repüléséről modellezték az emberi repülést, ezek az első mesterségesintelligencia-módszerek sem a természetes intelligencia visszafejtésén alapultak.

A továbbiakban lássuk ezen megközelítések példáit. Első használatuk óta nőtt a komplexitásuk, ami lehetővé tette olyan gyakorlatias termékek megalkotását, amelyekre nem jellemző a korai rendszerek törekenysége és magas hibaaránya.

Szakértői rendszerek. Az 1970-es években a mesterséges intelligenciát gyakran azonosították egy specifikus módszerrel: a szakértői rendszerekkel. Ebbe beletartozik az emberi szakértők döntéshozatalát szimuláló meghatározott logikai szabályok megalkotása is. Az eljárás alapvető részeként a tudásmérnökök megkérték az adott területek szakértőit, például orvosokat és mérnököket, hogy kodifikálják döntéshozatali szabályaikat.

Tettek korai előrelépéseket ezeken a területeken, mint például az orvosi diagnosztikai rendszerek esetében, amelyek hasonlítottak az orvosokra, legalább korlátozott jellegű vizsgálatokban. Például a MYCIN nevű rendszer, amelynek a célja az volt, hogy felismerje a fertőző betegségeket és javaslatokat adjon a kezelésükre vonatkozóan, az 1970-es években került kifejlesztésre. 1979-ben egy szakértő értékelőcsapat összehasonlította a MYCIN diagnosztikai és javaslattevési teljesítményét az

emberi orvosokéval, és kiderült, hogy a MYCIN ugyanolyan jól vagy jobban működött, mint az orvosok.^[499]

Ebből a kutatásból nyilvánvalóvá vált, hogy az emberi döntéshozás tipikusan nem definitív logikai szabályokon alapszik, hanem „puha” bizonyítékokon. Az orvosi vizsgálaton jelentkező sötét folt talán rákra utal, de a diagnózist más tényezők is befolyásolják, úgymint a folt pontos alakja, elhelyezkedése és kontrasztja. Az emberi döntésekben alkalmazott megérzéseket általában a korábbi tapasztalatokból származó többféle bizonyíték összeolvasztása adja, melyek közül önmagában egyik sem döntő erejű.

Gyakran nem is vagyunk tudatában annak, milyen szabályokat alkalmazunk.

Az 1980-as évek végére a szakértői rendszerek beolvasztották a bizonytalanság elvét, és a döntéshozatal során sokféle valószínűségi bizonyítékot egyesítettek. A MYCIN-rendszer élen járt ebben a megközelítésmódban. A MYCIN tipikus „szabályai” az alábbiakhoz hasonlítanak:

Ha a kezelésre váró fertőzés meningitis, és a fertőzés gombás típusú, és élő szervezetek nem láthatók a festett kultúrán, és a beteg nem veszélyeztetett gazda, és a beteg coccidiomycosiszal fertőzött területen járt, és a beteg rassza fekete, ázsiai vagy indián és a csf-tesztben a Cryptococcus antigén nem pozitív, akkor 50 százalék esélye van, hogy nem a Cryptococcus okozza a fertőzést.

Bár egyetlen ilyen valószínűségi szabály önmagában nem elegendő egy használható állításhoz, több ezer ilyen szabály kombinálásával fel lehet sorakoztatni a bizonyítékokat, és összesíteni lehet őket megbízható döntések meghozása érdekében.

Valószínűleg a legrégebb óta működő szakértőrendszer-projekt a CYC (mint enCIKlopédikus), amelyet Doug Lenat és kollégái hoztak létre a Cycorp-nál. Az 1984-ben indított CYC mindennapos ismereteket kódolt annak érdekében, hogy segítsen felvértetni a gépeket az emberi gondolatok és gondolkodás mögötti kimondatlan feltételezések megértésének képességével. A projekt a fix logikai szabályok helyett már valószínűségi szabályokat használ, és mára képes írott forrásokból ismereteket kinyerni (emberi felügyelettel). Az eredeti cél az volt, hogy megalkossanak egymillió olyan szabályt, amely az átlagember világról alkotott ismereteinek kis részét képezi. Lenat legújabb célkitűzése az, hogy a CYC 2007-ig megtanuljon „100 millió dolgot; körülbelül ezzel a számmal írható le, hogy egy átlagember mit tud a világról”.^{[500][13]}

Darryl Macer, a Japánban található Cukuba Egyetem biológiai tudományi docense egy másik ambíciózus szakértő rendszert épít. Azt tervezi, hogy kifejleszti az összes emberi gondolatot tartalmazó rendszert.^[501] Egy ilyen rendszer egyik alkalmazási módja az volna, hogy tájékoztatja a törvényhozást arról, melyik közösség milyen gondolatokat ápol.

Bayes-hálók. Az elmúlt évtizedben a Bayes-logikának nevezett technika lefektette a probabilisztikus szabályok ezrei vagy akár milliói összegzéséhez szükséges matematikai alapokat az úgynevezett „hithálók” vagy Bayes-hálók alkalmazásával. A megközelítést eredetileg az angol matematikus, Thomas Bayes dolgozta ki, de értekezése poszthumusz jelent meg 1763-ban. A módszer arra szolgál, hogy meghatározzuk a jövőbeli események valószínűségét a múlt hasonló eseményei segítségével.^[502] Sok, a Bayes-technikán alapuló szakértői rendszer gyűjt adatokat folyamatosan a saját tapasztalataiból, és így folyamatosan tanul és javítja döntéshozatali képességét.

A legígéretesebb spam-szűrők is ezen az elven működnek. Én személy szerint egy SpamBayes nevezetű spam-szűrőt használok, amely önmagát tanítja a „spam” vagy „rendben” jelöléssel ellátott e-

mailek alapján.^[503] A felhasználó azzal kezdi, hogy megmutat egy spam és egy normál e-mailekkel teli mappát a szűrőnek. Az eszköz ekkor előképi Bayes vélekedéshálózatát ezen mappák felhasználásával, és elemzi mindkettő mintáit, így lehetővé téve, hogy a további e-maileket automatikusan a megfelelő kategóriába tegye. Az eszköz minden egyes soron következő e-mailel továbbképi magát, főként amikor a felhasználó kijavítja a hibáit. Ez a szűrő kezelhetővé teszi számomra a spam-helyzetet, ami igazán nem semmiség, hiszen naponta kigyomlál kétszáz-háromszáz spam-üzenetet, és átenged több mint száz „jó” levelet. A „rendben lévőként” azonosított üzeneteknek csak egy százaléka spam; és jó üzeneteket szinte sohasem jelöl meg spamként. A rendszer majdnem olyan pontos, mint én volnék, és persze sokkal gyorsabb nálam.

Markov-modellek. A probabilisztikus hálózatok komplex információsorozatokon való alkalmazásának egyik példája a Markov-modellek használata.^[504] Andrej Andrejevics Markov (1856–1922), a híres matematikus, kialakította a „Markov-láncok” elméletét, amelyet később Norbert Wiener (1894–1964) csiszolt tovább 1923-ban. Az elmélet módszert kínált arra, hogyan lehet értékelni a valószínűségét annak, hogy megtörténik-e egy bizonyos eseménysorozat. A modell rendkívül népszerű, például a beszédfelismerésben, ahol a szekvenciális események maguk a fonémák (a beszéd részei). A beszédfelismerésben használt Markov-modellek kódolják az egyes fonémákban található hangok specifikus mintáit, ahogyan a fonémák egymásra hatnak, és a fonémák valószínű sorrendjeit. A rendszer magasabb nyelvi szinten, például a szavak szintjén is működteti a valószínűséghálózatot. A modellben található tényleges valószínűségek a valós emberi beszédre és nyelvi adatokon alapulnak, így a módszer önszerveződő jellegű.

A Markov-modellezés volt az egyik módszer, amit én és kollégáim saját beszédfelismerőrendszer-fejlesztésünkben alkalmaztunk.^[505] A fonetikai megközelítésekkel szemben, amelyekben a fonémasorozatokról alkotott meghatározott szabályokat emberi nyelvészek kódolják egyértelműen, mi nem mondtuk meg a rendszernek, hogy az angolban megközelítőleg negyvennégy fonéma található, sem azt, hogy ezek milyen sorozatokban fordulnak elő valószínűbben. Hagytuk a rendszert, hadd fedezze fel ezeket a „szabályokat” magának, több ezer órnyi átírt emberi beszédadat alapján. A megközelítés előnye a kézzel kódolt szabályokkal szemben az, hogy a modellek olyan kifinomult valószínűségi szabályokat is kialakítanak, amelyekről az emberi szakértők nem is feltétlenül tudnak.

Neurális hálók. Egy másik, a beszédfelismerésben és egyéb mintafelismerő projektekben használt népszerű önszerveződő módszer a neurális háló. Ebben a technikában neuronok és interneurális kapcsolatok leegyszerűsített modelljét szimuláljuk. Az egyik alapvető megközelítés a következő: egy adott bemenet minden pontját (a beszéd esetében minden pont két dimenziót képvisel, frekvenciát és időt; a képek esetében minden pont egy pixel egy kétdimenziós képen) véletlenszerűen hozzákapcsoljuk a szimulált neuronok első rétegének bemenetéhez. Minden kapcsolat rendelkezik egy hozzárendelt szinaptikus erősséggel, amely jelképezi a fontosságát – ezeket véletlenszerű értékre állítjuk be. Minden idegsejt összeadja a beérkező jeleket. Ha az összesített jel meghaladja a meghatározott küszöböt, a neuron tüzelni kezd és jelzést küld kimeneti kapcsolatára; ha az összesített bemeneti jel nem haladja meg a meghatározott küszöböt, a neuron nem tüzel és kimeneti értéke nulla. Az idegsejtek kimenetei véletlenszerűen vannak hozzákötve a következő rétegben található neuronok bemeneteihez. Több réteg létezik (általában kettő vagy három), és a rétegek többféle konfiguráció szerint szerveződhetnek. Például az egyik réteg visszatáplálhat egy korábbi rétegbe. A rendszer tetején, egy vagy több szinten véletlenszerűen választott neuron kimenete adja meg a választ. (A

neurális hálók algoritmusos leírásához lásd ezt a végjegyzetet: [{506}!](#))

Mivel a neurális hálók esetén a huzalozási és szinaptikus súlyokat véletlenszerűen állítjuk be, egy képzetlen neurális háló válaszai is véletlenszerűek lesznek. A kulcs a neurális hálóhoz tehát az, hogy meg kell tanulnia a céltárgyát. Mint az emlősgyak, amelyekről nagyjából modellezték, a neurális hálók kezdetben ostobák. A neurális háló tanítója – aki lehet egy ember, egy számítógépprogram, vagy talán egy másik, érettebb neurális háló, amely már megtanulta a leckéjét – jutalmazza a tanuló neurális hálót, amikor jó eredményt ad, és megbünteti, amikor rosszat. Ezt a visszajelzést a tanuló neurális háló arra használja, hogy beállítsa az interneurális kapcsolatok erősségét. A jó válasszal összefüggő kapcsolatok erősödnek, míg a rossz választ adók gyengülnek. Idővel a neurális háló átszervezi magát ahhoz, hogy tanítás nélkül is jó választ adjon. A kutatások bebizonyították, hogy a neurális hálók még megbízhatatlan tanárokkal is képesek megtanulni a leckét. Ha a tanár csak hatvan százalékban tudja a helyes választ, a tanuló neurális háló még abból is tanul.

Egy erős, jól megtanított neurális háló széles körű emberi mintafelismerést képes emulálni. A többretegű neurális hálókat használó rendszerek megdöbbentő eredményeket produkálnak az olyan mintafelismerési feladatok széles körében, mint például a kézírás, az emberi arcok, hitelkártya-megterhelésekhez hasonló kereskedelmi csalások, és sok egyéb dolog felismerésében. Saját, a neurális hálók használatában szerzett tapasztalatom szerint, a legnagyobb mérnöki feladat nem a hálók kódolása, hanem az, hogy automatizált tanító leckéket adjunk nekik, amelyek által megtanulják a kijelölt témájukat.

A neurális hálók jelenleg a biológiai idegi hálók valósághűbb és komplexebb modelljeit használják, mivel a neurális működés mind részletesebb modelljeit vagyunk képesek megalkotni az agy visszafejtéses megismerésének következtében.^{[\[507\]](#)} Mivel több évtizedes tapasztalatunk van az önszerveződő paradigmák terén, az agykutatás új eredményei gyorsan átültethetők a neurálisháló-kísérletekre.

A neurális hálók természetesen fogékonyak a párhuzamos feldolgozásra is, mivel az agy is így működik. Az emberi agynak nincsen központi processzora, ami szimulálná a neuronokat. Ehelyett minden egyes neuront és interneurális kapcsolatot egyéni lassú processzornak tekinthetünk. Komoly munka folyik annak érdekében, hogy olyan specializált chipeket alkossanak, amelyek neurálisháló-architektúrát alkalmaznak, és közben jelentősen nagyobb munkateljesítménnyel bírnak.^{[\[508\]](#)}

Genetikai algoritmusok (GA-k). A természet által ihletett másik önszerveződő paradigmához tartoznak a genetikai, vagy evolúciós algoritmusok, amelyek lemásolják az evolúciót, még a szexuális úton való szaporodást és a mutációkat is. Az alábbiakban egyszerűsítve bemutatom, hogyan működnek. Először is meghatározzuk, mily módon tudunk megfelelő megoldást adni a problémára. Ha a probléma egy repülőgépmotor tervparamétereinek optimalizálása, meghatározzuk a paraméterlistát (minden paraméterhez megfelelő számú bitet rendelve). Ezt a listát tekintjük a genetikai algoritmus genetikai kódjának. Majd véletlenszerűen több ezer vagy még több genetikai kódot generálunk. Minden ilyen genetikai kódot (amely egy sor tervparamétert határoz meg) egy szimulált „megoldási” organizmusnak tekintünk.

Ekkor minden szimulált organizmust kiértékelünk egy szimulált környezetben egy meghatározott módszer használatával. Ez az értékelés a genetikai algoritmus sikerének a kulcsa. A példánkban minden megoldási organizmust egy repülőgépmotor-szimulációra alkalmaznánk, és meghatároznánk, milyen sikeres az adott paraméterkészlet a számunkra érdekes kritériumok szempontjából (üzemanyag-fogyasztás, sebesség és így tovább). A legjobb megoldó organizmusok (a legjobb tervek)

fennmaradnak, és a többi megsemmisül.

Ezután minden fennmaradó organizmust addig szaporítunk, amíg újra el nem érünk egy meghatározott példányszámot. Ez a nemi úton való szaporodás szimulációjával történik. Más szóval minden új megoldási utód genetikai kódjának egy részét az egyik szülőtől és egy másik részét egy másik szülőtől örökli. Általában nem teszünk különbséget a hím és női organizmusok között; elegendő két önkényesen kiválasztott szülő utódját venni. Ahogy sokszorozódnak, lehetőséget hagyunk a mutációra (véletlenszerű változásra) a kromoszómákban.

Ha meghatároztunk egy nemzedéknyi szimulált evolúciót; most megismétljük a lépéseket minden egyes soron következő generáció esetében. Minden egyes generáció után meghatározzuk, mennyit javultak a tervek. Amikor a fejlődés a tervteremtmények két generációja között nagyon kicsi, leállítjuk a javítás ismétlődő körforgását, és a legutolsó generáció legjobb tervét/eit használjuk. (A genetikai algoritmusok algoritmikus leírásához lásd a következő végjegyzetet: [{509}](#)!)

A GA kulcsa az, hogy az emberi tervező nem közvetlenül programozza a megoldást, hanem hagyja, hogy az spontán módon jöjjön létre a szimulált verseny és javítás ismétlődő folyamatában. Mint már tárgyaltuk, a biológiai evolúció okos, de lassú folyamat, így intelligenciájának felerősítéséhez megtartjuk éleslátását, míg nagyban felgyorsítjuk az ütemét. A számítógép elég gyors ahhoz, hogy sok generációnyi változást szimuláljon órák, napok vagy hetek leforgása alatt. Ám csak egyszer kell végigmennünk ezen az ismétlődő folyamaton; hiszen ha egyszer hagyjuk végigfutni ezt a szimulált evolúciót, az evolválódott és rendkívül kifinomult szabályokat azonnal valódi problémákra alkalmazhatjuk.

A neurális hálókhoz hasonlóan a GA-k útján hasznót húzhatunk a kaotikus adatokban rejlő finom, ám mélyreható mintákból. A siker egyik alapvető kulcsa a lehetséges megoldások érvényes kiértékelése. Az értékelésnek gyorsnak kell lennie, mert a szimulált evolúció minden egyes generációjában sok ezer lehetséges megoldást kell számba vennie.

A GA-k mesterien kezelik a túl sok változóval dolgozó problémákat, és precíz analitikus megoldásokra jutnak. A repülőgépmotor tervezésénél például több mint száz változót kell kezelni és több tucat kritériumnak kell megfelelni. A General Electric kutatói által használt GA-k képesek voltak olyan repülőgépmotor-tervekkel előállni, amelyek pontosabban megfeleltek a követelményeknek, mint a hagyományos módszerek.

A GA-k használatánál azonban óvatosan kell eljárni. Jon Bird, a Sussexi Egyetem kutatója GA-t használt egy oszcillátor-áramkör optimális tervezéséhez. Több generációnyi próbálkozás kisszámú tranzisztorral hagyományos terveket szült, de a nyertes terv nem oszcillátor lett, hanem egy egyszerű rádióáramkör. Láthatóan a GA felfedezte, hogy a rádióáramkör felvette egy közeli számítógép oszcilláló rezgését.^{[\[510\]](#)} A GA megoldása csak az adott asztal közvetlen közelében működött, ahol a rendszer a probléma megoldásán dolgozott.

A genetikai algoritmusok a káosz- és komplexitáselmélet részeként egyre inkább alkalmasak egyébként követhetetlen üzleti problémák megoldására, például komplex beszállítói láncok optimalizálására. Ez a megközelítés lassan átveszi az analitikusabb módszerek helyét az egész iparágban. (Lásd a későbbi példákat.) A paradigma a mintafelismerést is mesterien végzi, és gyakran kombinálható a neurális hálókkal és egyéb önszervező módszerekkel. Ésszerű módja a számítógépszoftver írásának is, főként olyannak, amelynek egy érzékeny egyensúlyt kell megtalálnia az egymással versenyző erőforrások között.

A *usr/bin/god* című regényben egy vezető science fiction-író, Cory Doctorow a GA egy érdekes változatát használja egy mesterséges intelligencia létrehozására. A GA nagyszámú intelligens

rendszer hoz létre különböző módszerek bonyolult kombinációjával, amelyben minden kombinációt a genetikai kódja jellemez. Ezeket a rendszereket aztán egy GA használatával fejlesztik. A kiértékelési funkció a következőképpen működik: minden rendszer bejelentkezik különböző emberi chatszobákba, és megpróbálja embernek mutatni magát, ami alapvetően egy burkolt Turing-tesztnak felel meg. Ha egy ember az egyik chatszobában olyasmit kérdez, hogy „Mi vagy te, egy chatbot?” (egy automatikus program, amely a mai fejlettségi szintjén nem érti a nyelvet emberi szinten), az értékelésnek vége, a rendszer megszakítja a beszélgetést, és jelenti az eredményt a GA-nak. A pontszámot az határozza meg, milyen hosszú ideig volt képes emberként viselkedni, mielőtt ezt a kérdést nekiszegezték volna. A GA a technikák egyre bonyolultabb kombinációit dolgozza ki, amivel egyre inkább képes lesz emberként viselkedni.

Az alapgondolat legfőbb nehézsége itt az, hogy az értékelési funkció meglehetősen lassú, bár ez csak akkor válik érezhetővé, amikor a rendszerek valamennyire már intelligenssé váltak. A kiértékelési folyamatok továbbá párhuzamosan is futhatnak. Ez az érdekes elképzelés valójában hasznos módszer lehet a Turing-teszt megoldásában, hiszen ha egyszer eljutunk odáig, hogy elegendően kifinomult algoritmusokat táplálhatunk be egy ilyen GA-ba, elképzelhetővé válik a Turing-képes mesterséges intelligencia kifejlesztése.

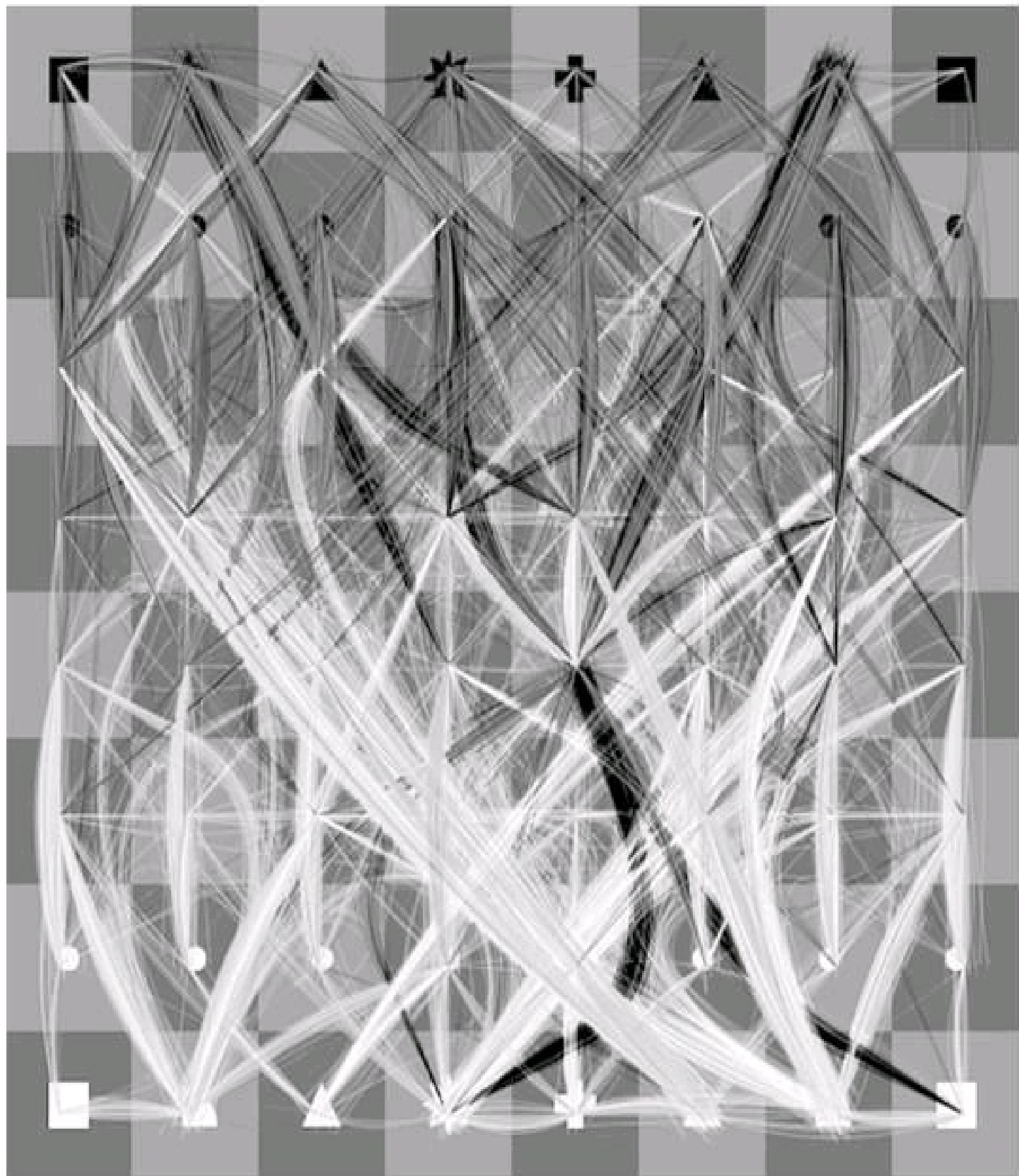
Rekurzív keresés. Gyakran a lehetséges megoldások nagyszámú kombinációjában kell keresést végeznünk, hogy megoldjunk egy adott problémát. Az egyik ilyen klasszikus példa a sakk. Amint a játékos a következő lépését fontolgatja, jegyzéket készíthet minden lehetséges lépésről, és aztán minden lehetséges lépéshez minden ellenfele által megtett lehetséges válaszlépésről és így tovább. Az emberi játékosoknak azonban nehéz fejben tartaniuk egy ilyen szerteágazó lépés-ellenlépés „fát”, és így nagyban a mintafelismerésre hagyatkoznak – a korábbi tapasztalataik alapján –, míg a gépek képesek elvégezni több millió lépés és válaszlépés logikai elemzését.

Ilyen logikai fa áll a legtöbb játékprogram középpontjában. Nézzük meg, hogyan is működik! Alkossunk egy programot a legjobb lépés kiválasztásához, amelyet elnevezünk A Legjobb Következő Lépés Választónak. Az LKLV úgy indul, hogy kilistázza az összes lehetséges lépést a tábla jelenlegi állapota alapján. (Ha a probléma egy matematikai tétel és nem játéklépések megoldása volna, a program a bizonyítási lánc összes lehetséges következő bizonyítási lépését listázná ki.) Minden egyes lépéshez a program megalkot egy hipotetikus táblát, amely tükrözi, hogy mi történne, ha ezt és ezt a lépést tennénk. Minden ilyen hipotetikus tábla esetén meg kell fontolnunk, mit tenne az ellenfelünk, ha mi ezt lépnénk. Ekkor jön be a rekurzív gondolkodás, mert az LKLV egyszerűen felkéri az LKLV-t (más szóval önmagát), hogy válassza ki ellenfelünk legjobb lépését. Magát felkérve az LKLV listázza ellenfelünk összes lehetséges lépését.

A program folyamatosan felkéri magát, annyi lépést átgondolva, amennyi időnk csak van. Így létrehoz egy hatalmas lépés-ellenlépés fát. Ez az exponenciális növekedés újabb példája, hiszen ahhoz, hogy előretekintsünk egy eggyel további lépésre (vagy ellenlépésre), körülbelül öttel kell megszoroznunk a rendelkezésre álló számításokat. A rekurzív formula sikerének a titka a lehetőségek fájának megkurtításából és növekedésének megállításából áll. A játék kontextusában ha egy táblán az állás reménytelen valamelyik fél részére, a program attól a ponttól leállíthatja a lépés-ellenlépés fa növelését (nevezzük a fa „végső levelének”), és a legújabban megfontolt lépést teheti meg a legvalószínűbb nyerő vagy vesztes lépésnek. Amikor ezek az egymásba épülő programszintek befejeződnek, a program meghatározza a jelenlegi aktuális állás szerinti, a létrehozott rekurzív kiterjesztés határain belüli és a kurtítási algoritmus szerinti legjobb lehetséges lépést. (A rekurzív

keresés algoritmikus leírásához lásd a következő jegyzetet: [{511}](#)!)

Fekete (számítógép)...
lépést fontolgat



Fehér (te)

A rekurzív formula gyakran hatékonynak bizonyul a matematikában is. A játéklépések helyett a „lépések” az adott matematikai terület axiómái, valamint korábban bizonyított tételei. A lehetséges lépések kiterjesztése itt a lehetséges axiómák (vagy korábban bizonyított tételek) listája, amelyeket az adott szinteken alkalmazni lehet a bizonyításhoz. (Newell, Shaw és Simons Általános Problémamegoldója is ezt a megközelítést alkalmazta.)

Ezekből a példákból úgy tűnhet, hogy a rekurzív bizonyítás csak olyan problémákra alkalmazható, amelyekben világosan meghatározott szabályaink és céljaink vannak. Ám ígéretesnek bizonyult a számítógép által készített művészi alkotások terén is. Például az általam megalkotott *Ray Kurzweil Kiberköltője* nevezetű program is rekurzív megközelítést használ.^[512] A program minden egyes szóra meghatároz egy adott célhalmazt – egy bizonyos ritmusképlet létrehozását, versstruktúrát és szóválasztást, amely a vers adott pontján kívánatos. Ha a program nem képes olyan szót találni, amely megfelel a kritériumoknak, visszalép, kitörli az azt megelőző szót, és újra meghatározza a kritériumokat, amelyeket a kitörölt szó esetén meghatározott, majd onnan újraindul. Ha az is zsákutcahoz vezet, újra visszalép egyet, és így lépeget vissza és előre. Végül, ha minden út zsákutca, döntésre kényszeríti magát azzal, hogy enyhít a kritériumok szigorúságán.

A módszerek kombinálása. Az tartós mesterségesintelligencia-rendszerek építésének leghatékonyabb módja a megközelítések kombinálása, ami az emberi agy működésének leképezése. Mint már mondtam, az agy nemcsak egyetlen nagy idegi háló, hanem több száz területből áll, amelyek mindegyike különböző információfeldolgozásra van optimalizálva. Önmagában a területek egyike sem működik az emberi teljesítőképesség szintjén, de az egész rendszer pontosan ezt teszi.

Saját, mesterséges intelligenciával kapcsolatos munkámban is alkalmaztam ezt a megközelítést, főként a mintafelismerésben. A beszédfelismerésben például létrehoztunk egy bizonyos számú különböző paradigmákon alapuló mintafelismerő rendszert. Némelyiket specifikusan szakértőktől beszerzett fonetikai és nyelvi követelmények ismeretével programoztuk. Egyesek mondatelemző szabályokon alapulnak (amibe beletartozik az általános iskolában tanított diagramokhoz hasonló, szóhasználatot jelző mondatdiagramok megalkotása is). Némelyik önszerveződő technikákon, például Markov-modelleken alapul, és rögzített, jegyzetekkel ellátott emberibeszéd-könyvtárak segítségével tanítottuk. Aztán programoztuk egy szoftveres „szakértő kezelőt”, amely felderíti a különböző „szakértők” (felismerők) erősségeit és gyengeségeit, és eredményeiket optimálisan egyesíti. Ebben a szellemben egy bizonyos, önmagában bizonytalan eredményeket hozó technika is hozzájárulhat a rendszer általános pontosságának növeléséhez.

Több kifinomult módszer létezik a mesterségesintelligencia-eszköztár különböző módszereinek kombinálására. Például használhatunk genetikai algoritmust a neurális hálók vagy Markov-modellek optimális topológiájának (csomópontok és kapcsolatok szervezetének) kifejlesztéséhez.

A GA által fejlesztett neurális háló végkimenetét aztán felhasználhatjuk egy rekurzív keresőalgoritmus paramétereinek vezérlésére. Az egészhez keverhetünk még mintafeldolgozó rendszerekhez kifejlesztett nagy teljesítményű jel- és képfeldolgozó technikákat. Minden meghatározott alkalmazási mód más architektúrát kíván. A számítógéptudós és mesterségesintelligencia-vállalkozó Ben Goertzel több könyvet és cikket írt az intelligencia mögött húzódó különféle módszerek kombinálásának stratégiáiról és architektúráiról. Novamente architektúrája az általános felhasználású mesterséges intelligencia keretül szolgálhat.^[513]

A fenti egyszerű leírások csak rövid pillanatfelvételt adnak arról, milyen egyre kifinomultabb mesterségesintelligencia-rendszereket terveznek nap mint nap. E könyvnek nem feladata a mesterségesintelligencia-technikák összefoglaló bemutatása, és még egy számítógép-tudományi doktori program sem elegendő minden napjainkban használt megközelítés bemutatásához.

A következő fejezetben bemutatandó, való világban használt gyenge mesterségesintelligencia-rendszerek többsége többféle, az adott feladatra integrált és optimalizált módszert alkalmaz. A gyenge MI-rendszerek gyorsan fejlődnek az olyan, korunkban párhuzamosan érvényesülő trendek hatására, mint amilyen a számítástechnikai erőforrások exponenciálisan megtérülő haszna, a sokezer alkalmazás által bővülő valóvilág-tapasztalat és az emberi agy intelligens döntéshozatali módszereit feltáró legújabb felfedezések.

A gyenge MI használatának példái

Amikor megírtam az első könyvemet a mesterséges intelligenciáról, „Az intelligens gépek kora” címmel az 1980-as évek végén, alapos kutatást kellett végezni a gyakorlati mesterséges intelligencia sikeres példáiról. Az internet nem volt olyan széles körben elérhető, mint ma, így hát könyvtárakba jártam és mesterséges intelligencia kutatóközpontokat látogattam az Egyesült Államokban, Európában és Ázsiában. Könyvemben nagyjából minden fellelhető és ésszerű példát bemutattam. Jelenlegi könyvem előkészületeinél egészen mást tapasztaltam: többeszeri jobbnál jobb példa árasztott el. A KurzweilAI.net weboldalon szinte mindennap megjelentetünk egy vagy több drámaian újszerű rendszerről szóló hírt.^[514]

2003-ban az Üzleti Kommunikációs Vállalat 21 milliárd dolláros piacot jósolt a mesterségesintelligencia-alkalmazásoknak 2007-re, átlagos évi 12,2 százalékos növekedéssel 2002 és 2007 között.^[515] A mesterséges intelligencia alkalmazásában vezető iparágak az üzleti intelligencia, a vevőkapcsolatok, a pénzügy, a védelmi ipar és belbiztonság, valamint az oktatás. Lássuk, mire is használható a gyenge mesterséges intelligencia a gyakorlatban!

Hadügy és hírszerzés. Az Egyesült Államok katonasága előszeretettel használja a mesterségesintelligencia-rendszereket. Mintafelismerő szoftverrendszerek irányítják az önműködő fegyvereket, mint például a nagy hatótávolságú rakétákat, amelyek több ezer mérföldet is repülnek, hogy megtaláljanak egy bizonyos épületet vagy akár ablakot.^[516] Bár a rakéták által átszelt terület megfelelő adatait előre betáplálják, a változó időjárási viszonyok, a növénytakaró és egyéb tényezők rugalmas valós idejű képfelismerést igényelnek.

A katonaság önszervező kommunikációs hálózatok („mesh hálózatok”) prototípusát fejlesztette ki, több ezernyi kommunikációs csomópont automatikus konfigurálása céljából, melyet például egy szakasz új helyszínre telepítése esetén alkalmaznának.^[517]

A Bayes-hálózatokat és GA-kat integráló szakértői rendszerek optimalizálják a több millió készletet és fegyvert mozgató ellátási láncokat a gyorsan változó frontkövetelmények között. A mesterségesintelligencia-rendszerek nap mint nap szimulálják a fegyverek, például nukleáris robbanószerek és rakéták teljesítményét.

Úgy tudjuk, a 2001. szeptember 11-i terrortámadásokat a Nemzetbiztonsági Hivatal mesterségesintelligencia-alapú Echelon rendszere előre jelezte, amely a hivatal masszív kommunikációs tevékenységet figyelő rendszerének eredményeit elemzi.^[518]

Sajnos az Echelon figyelmeztetéseit az emberi felelősök nem vették figyelembe, amíg már túl késő

nem lett.

A 2002-es afganisztáni hadjáratban bevetették a felfegyverzett Predatort, egy robotvadászrepülőgépet. Bár a légierő Predatorja már több éve fejlesztés alatt állt, a hadsereg által szállított rakétákkal való felszerelése egy utolsó percben végrehajtott improvizáció volt, ami meglehetősen sikeresnek bizonyult. A 2003-ban kezdődő iraki háborúban a felfegyverzett (és a CIA által alkalmazott) Predator és egyéb pilóta nélküli repülőgépek (UAV-ok, „drónok”) több ezer ellenséges harckocsit és rakétabázist semmisítettek meg.^[14]

Minden katonai szolgálat alkalmaz robotokat. A hadsereg barlangok és épületek felderítésére használja őket (például Afganisztánban). A haditengerészet kis robothajókat működtet repülőgép-anyahajói védelmére. Mint a következő fejezetből is kitűnik majd, az élő katonák kivonása a harci cselekményekből egyre erősödő tendencia.

Úrkutatás. A NASA önmegismerő rendszereket épít robotrepülőgépeit vezérlő szoftverjeibe.

Mivel a Mars körülbelül három fénypercre van a Földtől, és a Jupiter úgy negyven fénypercre (a bolygók pontos elhelyezkedésétől függően), az oda tartó űrhajók és a földi irányítás közti kommunikáció lényegesen késleltetett. Ezért fontos, hogy a küldetéseket irányító szoftver képes legyen saját taktikai döntéshozatalra. Ennek érdekében a NASA-szoftvert úgy tervezik, hogy az a saját és az űrjármű képességeinek modelljét is tartalmazza, valamint a küldetésen valószínűsíthetően tapasztalható nehézségeket.

Az ilyen MI-alapú rendszerek képesek új szituációkban gondolkodni, és nem csak előre programozott szabályokat követnek. Ez a megközelítés tette lehetővé, hogy a Deep Space One űrjármű 1999-ben a saját technikai ismereteinek felhasználásával önálló terveket készítsen a küldetést veszélyeztető beragadt kapcsoló problémájának megoldására, egy aszteroida felderítése közben.^[519] A mesterségesintelligencia-rendszer első terve csődöt mondott, de a második megmentette a küldetést. Brian Williams, a Deep Space One robotszoftverének egyik feltalálója, valamint az MIT-űrrendszerek és a Mesterséges Intelligencia Laboratóriumának kutatója szerint „ezek a rendszerek rendelkeznek belső alkatrészeik fizikájának egyszerű modelljeivel. [A jármű] e modellekből következtetve meg tudja határozni, mi a baj, és tudja, miként cselekedjen”.

Számítógépek hálózatát használva a NASA GA-kat (genetikai algoritmusokat) alkalmazott három Space Technology 5 műhold esetén az antenna kialakítására, amelyeknek a feladata a Föld mágneses mezejének vizsgálata. Több millió lehetséges terv versenyzett egymással a szimulált evolúciós folyamatban.

A NASA tudósa és projektvezetője, Jason Lohn szerint, „a [GA] szoftvert most apró, mikroszkopikus gépek, például giroszkópok kialakítására használjuk, az űrnavigáció elősegítése céljából. A szoftver olyan megoldásokat is feltalálhat, amelyekre egy emberi tervező sem gondolta.”^[520]

Egy másik NASA mesterségesintelligencia-rendszer magától megtanulta, hogyan különböztesse meg a nagyon elmosódott képeken látott csillagokat és galaxisokat olyan pontossággal, ami meghaladta az emberi csillagászokét.

Az új földi robotteleszkópok képesek saját döntéseket hozni arról, hová figyeljenek, és hogyan optimalizálják a kívánt jelenség megtalálásának valószínűségét. Az „autonóm, félintelligens obszervatóriumoknak” nevezett rendszerek képesek az időjárástól függően átállítani magukat, észrevenni a számukra érdekes jelenségeket, és döntést hozni a nyomon követésükről. Képesek alig látható jelenségeket is felderíteni, mint például egy nanoszekundum időtartamig elhalványuló

csillagot, amely egy, a naprendszerünk külső régióiban elhaladó kis aszteroidát jelezhet, amint elhalad a csillag előtt, kitakarva annak fényét.^[521] Az egyik ilyen, MOTESS-nek (Mozgó Tárgy és Tranziens Esemény Kereső Rendszernek) nevezett rendszer magától azonosított 180 új aszteroidát és több üstököst működése első két évében. „Intelligens megfigyelő rendszerünk van” – magyarázta az Exeter Egyetem csillagásza, Alasdair Allan. „Magától gondolkodik és reagál, eldönti, hogy valami, amit felfedezett, elég érdekes-e, hogy további megfigyeléseket tegyen. Ha ezekre szükség van, folytatja a kutatást és megszerzi az adatokat.”

A katonaság is hasonló rendszereket használ a kéműholdak adatainak automatikus elemzésére. A jelenlegi műhold-technológia képes megfigyelni a hüvelyk nagyságú földfelszíni kiszögelléseket, és nem akadályozza a rossz idő, a felhők, vagy a sötétség.^[522] A folyamatosan generált hatalmas adathalmaz nem volna kezelhető releváns változások észlelésére programozott automatizált képfelismerés nélkül.

Orvostudomány. Ha valaki elektrokardiogramot (EKG-t) készített, az orvosa valószínűleg egy EKG-felvételre alkalmazott mintafelismerést tartalmazó automatizált diagnózist kap. A saját vállalatom (a Kurzweil Technologies) együttműködve az Egyesült Terapeutikával automatizált EKG-elemzők új generációját fejleszti a szívbetegségek korai figyelmeztető jeleinek hosszú távú, feltűnés nélküli megfigyelése céljából (a ruházatba épített szenzorok és mobiltelefonos, drót nélküli kommunikáció használatával).^[523] Egyéb mintafelismerő rendszereket is használnak képi adatok értelmezésére.

Minden jelentősebb gyógyszercég használ mesterségesintelligencia-programokat az új gyógyszeres kezelések kifejlesztését segítő mintafelismerés és intelligens adatbányászat céljából. Például az SRI International rugalmas tudásbázisokat épít, amelyek egy tucat patogénről, köztük a TBC-ről és *H. pylori*-ról (a fekélyeket okozó baktériumról) felhalmozott összes tudásunkat kódolják.^[524] A cél intelligens adathalászó eszközök alkalmazása (olyan szoftver, amely új kapcsolatokat keres az adatok között) az ezen patogének metabolizmusának elpusztítására vagy szétverésére alkalmas új módszerek megtalálása érdekében.

Hasonló rendszereket alkalmaznak egyéb betegségek új terápiáinak automatikus felfedezésére, és a gének funkciójának, illetve betegségekben vállalt szerepének megismerésére is.^[525] Például az Abbott Laboratórium azt állítja, hogy egyik új, mesterségesintelligencia-alapú robot- és adatelemző rendszerrel felszerelt laboratóriumában hat emberi kutató ugyanannyi munkát végez el, mint kétszáz kutató régebbi gyógyszerfejlesztési laborjaikban együttesen.^[526]

A magas prosztataspecifikus antigén (PSA) szintekkel rendelkező férfiak általában biopszián esnek át, de körülbelül 75 százalékuknak nincsen prosztatarákja. A vérben található fehérjék mintáinak felismerésére alapuló új vizsgálat 29 százalékra csökkentheti a hamis pozitív eredmények arányát.^[527] A vizsgálat a Marylandben található bethesdai Correlogic Systems vállalat által kifejlesztett mesterségesintelligencia-programra épül, amelynek pontosságában további javulás várható a későbbi fejlesztések révén.

A fehérjemintákra alkalmazott mintafelismerést a petefészekrák kimutatására is használták már. A legjobb mai petefészekrák-vizsgálat, a CA-125, hiába kombinálják az ultrahangos módszerrel, szem elől téveszt szinte minden korai stádiumban lévő tumort. „Mire diagnosztizálják, a petefészekrák túl gyakran már gyógyíthatatlan” – állítja Emanuel Petricoin III, az FDA és az Országos Rákintézet által működtetett Klinikai Proteomika Program társigazgatója. Petricoin egy új mesterségesintelligencia-alapú vizsgálat fő fejlesztője, amely csak a rák esetén megjelenő, egyedülálló fehérjemintákat keresi.

A több száz vérmintát tartalmazó értékelésben a vizsgálat – a Petricoin szerint – „megdöbbentő, 100%-os pontossággal mutatta ki a rákot, a legkorábbi stádiumaiban is.”^[528]

Az összes egyesült államokbeli Pap-teszt (méhnyakrákteszt) körülbelül tíz százalékát egy a TriPath Imaging fejlesztette FocalPoint nevű öntanító MI-program elemzi. A fejlesztők úgy kezdték munkájukat, hogy megkérdezték a patológusokat, milyen kritériumokat használnak. A mesterségesintelligencia-rendszer aztán megfigyelte a szakértő patológusokat. A programnak csak a legjobb emberi diagnosztáktól volt szabad tanulnia. „Ez a szakértői rendszer előnye” – magyarázza Bob Schmidt, a TriPath műszaki termékmenedzsere. „Lehetővé teszi, hogy lemásoljuk a legjobb dolgozókat.”

Az Ohio Állami Egyetem Egészségügyi Rendszere kidolgozott egy számítógépes orvosi előírási (CPOE) rendszert, amely többféle orvosi diszciplína kiterjedt ismeretével rendelkező szakértői rendszeren alapul.^[529] A rendszer automatikusan leellenőrzi az orvos javaslatait, a beteg lehetséges allergiáit, a gyógyszerek kölcsönhatásait, a kétszeres felírásokat, a gyógyszerallergiákat, az adagolási irányelveket, valamint információt a betegről a kórház labor és radiológiai osztályáról.

Természettudományok és matematika. A Walesi Egyetem egy eredeti elméleteket megfogalmazni képes mesterségesintelligencia-alapú rendszert a robotrendszerrel ötvöző „robottudóst” fejlesztett ki, amely, amely képes automatikusan kísérleteket végrehajtani, és egy okfejtő egységgel is rendelkezik, amely kiértékeli az eredményeket. A kutatók adtak a teremtményüknek egy élesztőgomba-génexpressziós modellt.

A rendszer „automatikusan származtat hipotéziseket a megfigyelések megmagyarázására, kísérleteket tervez a hipotézisek ellenőrzésére, fizikailag levezényli a kísérleteket a laborrobot segítségével, értelmezi a kapott eredményeket, megcáfolja az adatoknak ellentmondó hipotéziseket, és aztán megismétli a kört.”^[530] A rendszer képes javítani a saját teljesítményét azáltal, hogy tanul a saját tapasztalataiból. A robottudós által kitalált kísérletek háromszor olcsóbbak lettek, mint az emberi tudósok által megalkotottak. A gépet egy csoport emberi tudós ellen tesztelve bebizonyosodott, hogy a gép felfedezései egy szinten álltak az emberekével.

Mike Young, a Walesi Egyetem biológiai igazgatója az egyik olyan emberi tudós, aki vesztett a géppel szemben. Azt mondja, „a robot tényleg megvert, de csak azért, mert egy ponton rossz gombot nyomtam meg”.

Az algebra egyik régi sejtését is egy MI-rendszer oldotta meg az Argonne Nemzeti Laboratóriumban.

Az emberi matematikusok a bizonyítást „kreatívnak” nevezték.

Üzleti élet és pénzügy. A vállalatok minden iparágban felhasználják az MI-rendszereket a logisztika vezérlésére és optimalizálására, a csalások és pénzmosás felderítésére, és a nap mint nap összegyűjtött információáradatban végzett intelligens adatbányászatra. A Wal-Mart például nagy mennyiségű információt gyűjt vásárlókkal történő tranzakcióiból. A mesterségesintelligencia-alapú, neurális hálókat és szakértői rendszereket használó eszközök felülvizsgálják ezeket az adatokat, hogy piackutatási jelentési rendszerrel szolgáljanak a menedzsereknek. Ez az intelligens adatbányászat teszi lehetővé, hogy a rendszer megdöbbentően pontos jóslatokat adjon arról, mekkora üzletben melyik termékből milyen mennyiségben lesz szükség.^[531]

Az MI-alapú programokat rendszerint pénzügyi tranzakciókban elkövetett csalások felderítésére is használják. A Future Route, egy angol cég, például az iHexet kínálja, amely az Oxfordi Egyetemen

kifejlesztett mesterségesintelligencia-rutinokon alapul, és a hitelkártya-tranzakciókban, illetve hitelkérelmekben elkövetett csalásokat fedezi fel.^[532] A rendszer tapasztalatai alapján folyamatosan generálja és frissíti saját szabályait. A First Union Home Equity Bank Charlotte-ban, Észak-Karolinában, a Hitelrendezőt, egy hasonló MI-alapú rendszert használ annak eldöntésére, hogy elfogadja-e a lakáshitel-kérelmeket.^[533]

A NASDAQ hasonló, tanulni képes Értékpapír Megfigyelő, Hírelemző és Szabályzó (SONAR) elnevezésű rendszert alkalmaz a csalások és lehetséges házon belüli tranzakciók kiszűrésére.^[534] 2003 végére a SONAR több mint 180 esetet derített fel és jelzett az Egyesült Államok Értékpapír és Tőzsd felügyeletének, illetve az Igazságügyi Minisztériumnak. Ezek között több olyan ügy is szerepelt, amely később jelentős sajtófigyelmet is kapott.

A Patrick Winston (az MIT Mesterséges Intelligencia Laboratórium igazgatója, 1972–1997) alapította Ascent Technology által tervezett Okos Reptéri Műveleti Központ (SAOC) elnevezésű, GA-alapú rendszer képes optimalizálni egy repülőtér komplex logisztikáját, úgymint a több száz dolgozó munkafeladatainak egyensúlyban tartását, a kapu- és felszerelésekiosztásokat, és megannyi egyéb részletet.^[535] Winston felhívja a figyelmet arra, hogy „a genetikai algoritmusok pontosan a bonyolult helyzetek optimalizálására születtek”. Az SAOC körülbelül 30 százalékkal növelte a termelékenységet azokon a reptereken, ahol bevezették.

Az Ascentnek először az 1991-es iraki Sivatagi Vihar hadművelet logisztikájának szervezésében kellett alkalmaznia mesterséges intelligenciáját. A Fejlett Védelmi Kutatási Projektek Ügynöksége (DARPA) állítása szerint az MI-alapú logisztikatervező rendszerek, mint az Ascent-rendszer, több megtakarítást eredményeztek, mint a kormány összes kutatási beruházása a mesterséges intelligenciába évtizedek alatt.

A mai szoftveres trend szerint az MI-rendszerek figyelemmel követik a komplex szoftverrendszerek teljesítményét, felismerik a működési zavarokat, és megállapítják, mi a legjobb módja az automatikus javításnak anélkül, hogy feltétlenül jelentenék az emberi felhasználónak.^[536]

Az elképzelés abból a felismerésből ered, hogy míg a szoftverrendszerek egyre komplexebbé válnak, az emberekhez hasonlóan soha nem lesznek tökéletesek, és lehetetlen minden bugot, minden szoftverhibát kiiktatni. Mi, emberek ugyanazt a stratégiát alkalmazzuk: nem akarunk tökéletesek lenni, de általában megpróbáljuk kijavítani a nyilvánvaló hibákat. „A feje tetejére akarjuk állítani a rendszer menedzsment gondolatát” – mondja Armando Fox, a Stanford Egyetem Szoftverinfrastruktúra Csoportjának vezetője, aki az „autonóm számítástechnikának” nevezett területen dolgozik. Fox szerint „a rendszernek képesnek kell lenni beállítani, optimalizálni magát. Ki kell javítani a saját hibáját, és ha valami baj van, tudnia kell, hogyan reagáljon a külső veszedelmekre.” Az IBM, Microsoft és egyéb szoftverforgalmazók mind autonóm képességeket integráló rendszereket fejlesztenek.

Gyártás és robotika. A számítógéppel integrált gyártás (CIM) egyre inkább kihasználja a mesterségesintelligencia-technikák nyújtotta előnyöket az erőforrások optimalizálása, a logisztika karcsúsítása és a készletcsökkentés területein, az alkatrészek és készletek éppen időben történő beszerzésével. A CIM-rendszerek legújabb trendje az „esetalapú következtetés” a hardverbe kódolt, szabályalapú szakértői rendszerek helyett. Az ilyen gondolkodás a tudást „esetek” formájában kódolja, amelyek problémapéldák megoldásokkal. A kezdeti helyzeteket általában mérnökök tervezik, de a sikeres esetalapú rendszer kulcsa az a képesség, hogy a tényleges tapasztalatból új eseteket generáljon. A rendszer ekkor már képessé válik a tárolt esetek alapján történő okfejtésre új helyzetek bekövetkeztekor.

A gyártásban egyre szélesebb körben használnak robotokat. A robotok legújabb nemzedéke a massachusettsi Natickben lévő Cognex Corporation által kifejlesztett, MI-alapú gépilátás-rendszereket alkalmaz, amelyek rugalmasan reagálnak a változó helyzetekre. Ez csökkenti a robotok pontos beállításának szükségességét. Brian Carlisle, a kaliforniai Livermore-ban bejegyzett Adept Technologies gyáriautomatizálás-vállalat vezérigazgatója rámutat, hogy „még ha ki is vonjuk a munkaerő költségét [a számításból], a robotikus és egyéb rugalmas automatizálás még úgy is hasznosnak bizonyul. A minőségen és teljesítményen túl olyan gyors termékváltást és -evolúciót tudunk biztosítani a felhasználóknak, amelyeknek a gépsorok átalakítása a nyomába sem érhet.”

Az MI-alapú robotika vezető kutatóinak egyike, Hans Moravec, megalapította Seegrid nevű vállalatát, hogy gépilátás-technológiáját a gyártás, anyagmozgatás és a katonai küldetések terén alkalmazza.^[537] Moravec szoftverjei képessé tesznek egy eszközt (egy robotot vagy egy egyszerű anyagmozgató kocsit) arra, hogy végigsétáljon vagy -guruljon egy rendezetlen környezetben, és egy bejárás után megbízható „voxel” (háromdimenziós pixel) térképet rajzoljon arról a környezetről. A robot aztán fel tudja használni a térképet és a saját okfejtési képességeit ahhoz, hogy meghatározza a feladat végrehajtásának optimális és akadálymentes útját.

Ez a technológia képessé teszi az autonóm kocsikat arra, hogy anyagokat szállítsanak a gyártási folyamatban a hagyományos, előre programozott robotrendszerek esetén szükséges, magas fokú előkészületek nélkül. Katonai helyzetekben az autonóm járművek precíz küldetéseket képesek végrehajtani, miközben alkalmazkodnak a gyorsan változó feltételekhez és harctéri körülményekhez.

A gépi látás továbbá javítja a robotok abbéli képességét, hogy emberekkel kommunikáljanak. Az apró, olcsó kamerák használatával a fej- és szemkövető szoftverek képesek érzékelni az emberi felhasználó elhelyezkedését, miáltal a robotok és a képernyőn megjelenő virtuális személyiségek szemkontaktust létesíthetnek, ami a természetes beszélgetés egyik kulcsfontosságú eleme. A fej- és szemkövető rendszereket a Carnegie Mellon Egyetemen és az MIT-n fejlesztették ki, és az olyan kis cégek is forgalmazzák, mint a Seeing Machines of Australia.

A gépi látás egyik meggyőző demonstrációján egy MI-rendszer kormányozta jármű szinte teljesen egyedül eljutott Washington, D.C.-ből San Diegóba.^[538] Bruce Buchanan, a Pittsburghi Egyetem IT-professzora és az Amerikai Mesterséges Intelligencia Egyesület elnöke felhívta a figyelmet arra, hogy ez a fegyvertény „tíz évvel ezelőtt elképzelhetetlen lett volna”.

A Palo Alto Kutatóközpont (PARC) olyan robotrajt fejleszt, amely képes bonyolult környezetekben, például katasztrófa sújtotta övezetekben navigálni, és megkeresni különböző dolgokat, például sérült embereket. Egy MI-bemutatón, a 2004. szeptemberi San José-i mesterségesintelligencia-konferencián önszerveződő robotcsoportot mutattak be egy realisztikus katasztrófa sújtotta övezetben.^[539] A robotok képesek voltak a terepen tájékozódni, kommunikáltak egymással, képi mintafelismerést alkalmaztak, és testhő alapján azonosították az embereket.

Beszéd és nyelv. A mesterséges intelligencia előtt álló egyik legnagyobb kihívás a nyelv természetes használata.

Az egyszerű trükkök nem, csak az emberi intelligencia elveinek teljes megismerése teszi majd képessé a számítógépes rendszereket arra, hogy meggyőzően emulálják az emberi párbeszédet, még ha az csak szöveges üzenetekre korlátozódik is. Ez volt Turing máig érvényes felfedezése is, amikor megalkotta teljesen az írott szövegre épülő tesztjét.

Bár még nem érik el az emberi szintet, a természetes nyelvfeldolgozó rendszerek erőteljesen fejlődnek. A keresőszolgáltatások olyan népszerűek lettek, hogy a „Google” tulajdonnévből köznapi

ige lett, és technológiája forradalmasította a kutatást, valamint a tudáshoz való hozzáférést. A Google és az egyéb keresőszolgáltatások mesterségesintelligencia-alapú statisztikai tanulási módszereket és logikai következtetéseket alkalmaznak a linkek osztályozásának meghatározásában. Ezen keresőprogramok legnyilvánvalóbb hibája az, hogy nem képesek megérteni a szavak mögötti kontextust. Bár egy gyakorlott felhasználó megtanulja, hogyan alkosson úgy kulcsszósorozatokat, hogy megtalálja a legmegfelelőbb oldalakat (például a „computer chip” keresés valószínűleg nem dobja ki azokat a burgonyaszirommal kapcsolatos találatokat, amiket a „chip” önmagában kidobna), amit igazán elérni szeretnénk, az az, hogy természetes nyelvet használva beszélgethessünk a keresőszolgáltatással. A Microsoft kifejlesztett egy Kérdezd az MSR-t (Kérdezd a Microsoft Kutatót) elnevezésű, természetes nyelvet alkalmazó keresőprogramot, amely valóban természetes nyelven feltett kérdésekre válaszol, olyanokra, mint „Mikor született Mickey Mantle?”^[540] Miután a rendszer elemzi a mondatot, hogy megtalálja a megfelelő elemeket (alany, állítmány, tárgy, jelzők, határozók és így tovább), egy speciális keresőprogram megkeresi az elemzett mondat alapján a kért információt. A megtalált dokumentumokban a kérdésre válasznak látszó mondatokat keres, és találati pontosság szerint listázza a lehetséges válaszokat. A helyes válasz legalább 75 százalékban szerepel az első három helyen, és a helytelen válaszok gyakorta nyilvánvalóak (mint például „Mickey Mantle 3-ban született”). A kutatók azt remélik, olyan tudásbázisokat adhatnak a rendszerükhöz, amelyek csökkentik az értelmetlen válaszok fontosság szerinti megjelenési arányát.

A Microsoft kutatója, Eric Brill, a Kérdezd az MSR-t kutatás vezetője egy még bonyolultabb feladatot is megkísérelt megoldani: olyan rendszert akart építeni, amely ötven vagy még több szóban válaszol olyan komplex kérdésekre, mint „Hogyan választják ki a Nobel-díjasokat?” A rendszer által alkalmazott egyik stratégia az, hogy keres egy megfelelő GYIK-et az interneten, ami válaszol a kérdésre.

A piacra kezdenek betörni a természetes nyelvű rendszerek nagy szókincsű, beszélőfüggetlen (azaz bármely beszélőnek válaszoló) telefonos beszédfelismerő rendszerek, amelyek alkalmasak hétköznapi tranzakciók végrehajtására. A British Airways virtuális utazási ügynökével bármiről lehet beszélgetni, ha a téma a jegyfoglalás.^[541] Amennyiben az ember a Verizon ügyfélszolgálatát vagy a Charles Schwabet és Merrill Lynchet hívja pénzügyi tranzakciók ügyében, valószínű, hogy virtuális személyiségekkel beszélget. Ezek a rendszerek, míg egyeseket idegesítenek, egész tűrhetően válaszolnak az emberek gyakran kétértelmű és töredezett kérdéseire. A Microsoft és egyéb cégek olyan rendszereket kínálnak, amelyek képesek egy vállalatnak virtuális ügynököt létrehozni, aki jegy- és hotelfoglalásokat intéz utazások esetére, és mindenféle rutintranzakciót elvégez kétirányú, viszonylag természetes hangú párbeszédekkel.

Nem minden telefonáló van megelégedve a virtuális ügynökök képességeivel, de a legtöbb rendszer felkínálja, hogy emberi ügyintézővel is beszélgethessünk. Az ezeket a rendszereket alkalmazó vállalatok azt jelentették, hogy 80 százalékkal csökkentették emberi ügyintézőik számát. A megtakarításon túl a telefonközpontok méretének csökkentése is haszonként jelenik meg. A telefonközpontos munkák fluktuációja rendkívül magas az alacsony munkaelégedettség miatt.

Állítólag a férfiak gyűlölik megkérdezni az utat, ha eltévednek, de az autókereskedők szerint mind a férfi, mind a női vezetők segítséget kérnek a saját autójuktól, amikor el akarnak jutni valahová. 2005-ben az Acura RL és Honda Odyssey olyan IBM-rendszert kínál majd, amelynek segítségével a felhasználók beszélgethetnek az autójukkal.^{[542][15]} A navigálási rendszerek utcaneveket fognak tartalmazni (például „forduljon balra a Fő utcán, aztán jobbra a Második sugárúton”). A felhasználók feltehetnek kérdéseket, például „Hol van a legközelebbi olasz étterem?”, vagy szóban is megadhatnak pontos helyeket, útbaigazítást kérhetnek és parancsokat adhatnak az autónak (például „Állítsd

erősebbre a légkondicionálást!”). Az Acura RL az útviszonyokat és csúcsidőben a forgalmi dugókat is valós időben nyomon követi majd a képernyőjén.

A beszédfelismerés állítólag beszélőfüggetlen, és nincsenek rá hatással a motorzajok, a szél és egyéb zavaró tényezők. Úgy hírlik, a rendszer 1,7 millió utca- és városnevet, továbbá közel ezer parancsot ismer.

A számítógépes fordítás is fokozatosan fejlődik. Mivel ez egy Turing-szintű feladat – tehát ahhoz, hogy emberi szinten végrehajtható legyen, a nyelv emberi szintű ismerete szükséges –, az egyik utolsó olyan alkalmazási terület lesz, amely versenyre kel az emberi teljesítménnyel. Franz Josef Och, a Dél-Kaliforniai Egyetem számítógéptudósa kifejlesztett egy technikát, amely képes létrehozni egy új nyelvi fordítórendszert bármilyen két nyelv között órák vagy napok leforgása alatt.^[543] Mindössze egy „rosette-i köre” van szüksége – egy szövegre az egyik nyelven és a fordítására a másikon –, bár az igaz, hogy ebből a kettőből több millió szóra. Egy önszerveződő technika használatával a rendszer képes megalkotni saját statisztikai modelljeit arról, hogyan lett lefordítva a szöveg az egyik nyelvről a másikra, és mindkét irányban továbbfejleszti ezeket a modelleket.

Ez szemben áll a más fordítórendszerekben használatos módszerekkel, amelyekben a nyelvészek fáradságot nem kímélve kódolják a nyelvtani szabályokat, és minden szabályhoz hosszú kivételjegyzéket csatolnak. Och rendszere nemrégiben a legmagasabb pontszámot kapta az Egyesült Államok Kereskedelmi Minisztériuma Szabvány- és Technológiai Intézete által szervezett fordítórendszer-versenyen.

Szórakoztatás és sport. A GA-k egyik érdekes és szórakoztató alkalmazásában az oxfordi tudós, Torsten Reil animált figurákat alkotott szimulált izületekkel és izmokkal, és agy helyett neurális hálóval. Adott nekik egy feladatot: hogy járjanak. Egy GA használatával kifejlesztette ezt a képességet, melyhez hétszáz paramétert kellett megfelelően beállítani. „Ha emberi szemmel tekintünk a rendszerre, rájövünk, hogy ez nem lehetséges, hiszen a rendszer annyira komplex” – állítja Reil. – „Itt jön be az evolúció a képbe.”^[544]

Míg kifejlődött teremtményei könnyedén és meggyőzően jártak, a kutatás a GA-k egy jól ismert tulajdonságát is bemutatta: azt kapod, amire befizettél. Néhány teremtmény új járási módokat talált ki. Reil szerint, „voltak ott olyan teremtmények, amelyek nem is jártak, hanem fura módon közlekedtek: kúsztak vagy cigánykerekeztek”.

Már fejlesztés alatt állnak olyan szoftverek, amelyek képesek automatikusan kivágni olyan részleteket egy sportmérkőzés felvételéből, amelyek a legfontosabb pillanatokot tartalmazzák.^[545] A Dublini Trinity College csapata olyan asztali játékokon kísérletezik, mint a biliárd, amelyben egy szoftver nyomon követi a labdák elhelyezkedését, és arra van programozva, hogy észrevegye, mikor történik jelentős pontszerzés. A Firenzei Egyetem csapata a focival kísérletezik. Ez a bizonyos szoftver a játékosok elhelyezkedését jegyzi meg, és képes azonosítani a játék jellegzetes mozzanatait – például a szabadrúgást, a gólszerzést, a büntetőket és egyéb lényeges történéseket.

A Londoni Egyetem (UCL) Digitális Biológiai Csoportja Formula–1-es versenyautókat tervez GA-k segítségével történő tenyésztés útján.^[546]

A mesterséges intelligencia telének már régen vége. Ma már jócskán benne járunk a gyenge MI tavaszában. A legtöbb fenti példa mindössze tíz-tizenöt éves kutatási projektről mesél. Ha a világon minden mesterségesintelligencia-rendszer egyszer csak megszűnne működni, a gazdasági infrastruktúránk összeroppanna. A bankrendszer tönkremenne. A közlekedés nagy része megbénulna. A kommunikáció nem működne. Egy évtizede még nem ez volt a helyzet. Természetesen MI-

rendszerünk még nem elég okosak ahhoz, hogy ilyen összeesküvést tervezzenek ellenünk.

Erős mesterséges intelligencia

„Ha csak egyféleképpen értesz meg valamit, akkor nem érted igazán. Ez azért van, mert ha valami balul üt ki, ott ragadsz a gondolatoddal, ami csak csücsül a fejedben anélkül, hogy valami történne. Hogy a valami valójában mit jelent, az attól függ, hogyan sikerült összekapcsolnunk minden egyébbel, amit tudunk. Ezért van az, hogy amikor valaki magolva tanul, azt mondjuk, nem igazán értette meg az anyagot. Ám ha sok különböző reprezentációt őrzünk valamiről, kipróbálhatunk egy másik megközelítést, amikor az egyik elképzelés csődöt mond. Persze a túl sok felesleges kapcsolat is meglágyítja az agyunkat. Ám a jól összekapcsolt reprezentációk elősegítik, hogy megforgassuk a gondolatokat a fejünkben, hogy több szempontból megvizsgálhassunk dolgokat, amíg meg nem találjuk, melyik a megfelelő a számunkra. És pont ezt értjük gondolkodás alatt!”

(Marvin Minsky)⁽⁵⁴⁷⁾

„A számítógépes teljesítmény fejlesztése olyan, mint a tájat lassan elárasztó víz. Fél évszázada elkezdte elönteni az alacsonyabb területeket, elűzve az emberi kártevőket és nyilvántartó hivatalnokokat, ám a legtöbben szárazak maradtunk. Mostanra az ár elérte a hegyek lábát, és az ottani előőrseink a visszavonulást fontolgatják. Biztonságban érezzük magunkat a csúcson, de ha az események a jelenlegi sebességgel folytatódnak, egy fél évszázad alatt ezek a csúcsok is víz alá kerülnek. Azt javaslom, amikor közeleg az a nap, építsünk bárkákat és szálljunk vízre! Egyelőre azonban csak az alacsonyabb területeken élő társainkra számíthatunk, ha tudni akarjuk, milyen a víz. A sakk és tételbizonyítás dombságában tanyázó társaink az intelligencia megjelenését jelentették. Miért nem kaptunk hasonló jelentéseket a síkságokról évtizedekkel ezelőtt, amikor a számítógépek már meghaladták az emberi számolás és memorizálás szintjét? Igazából kaptunk. A több ezer matematikushoz hasonló számolási képességű számítógépeket »nagy elméknek« kiáltották ki, és rájuk alapozták a mesterségesintelligencia-kutatás első nemzedékét. Végül is a gépek olyasmire lettek képesek, ami túlment minden állati szinten, amihez emberi intelligenciára, koncentrációra és évekig tartó tanulásra volt szükség. De nehéz az idő távlatából újra átélni azt a varázst.

Ennek az egyik oka az, hogy a számítógépek más területeken tanúsított ostobasága elfogulttá teszi az ítéletünket.

Egy másik ok a saját együgyűségünkkel van összefüggésben: csak nagy erőfeszítések árán és rajtunk kívül álló eszközök segítségével tudunk számolni és nyilvántartásokat vezetni, és így a hosszú számítások kis mechanikus lépései nyilvánvalóvá válnak, miközben a nagyobb összefüggések rejtve maradnak előttünk. Mint a Deep Blue építői, túlzottan a saját oldalunkról látjuk a folyamatot ahhoz, hogy értékelni tudjuk azt a kifinomultságot, amit a külső szemlélő talán észrevesz. Ám van valami nem egyértelmű a hóviharokban és tornádókban, ami előbukkan az időjárási szimulációk ismétlődő számításai mögül, vagy a Tyrannosaurus rex bőrének animációs kalkulációkból felmerülő hullámvázában. Nemigen hívjuk intelligenciának, de a »mesterséges valóság« talán még

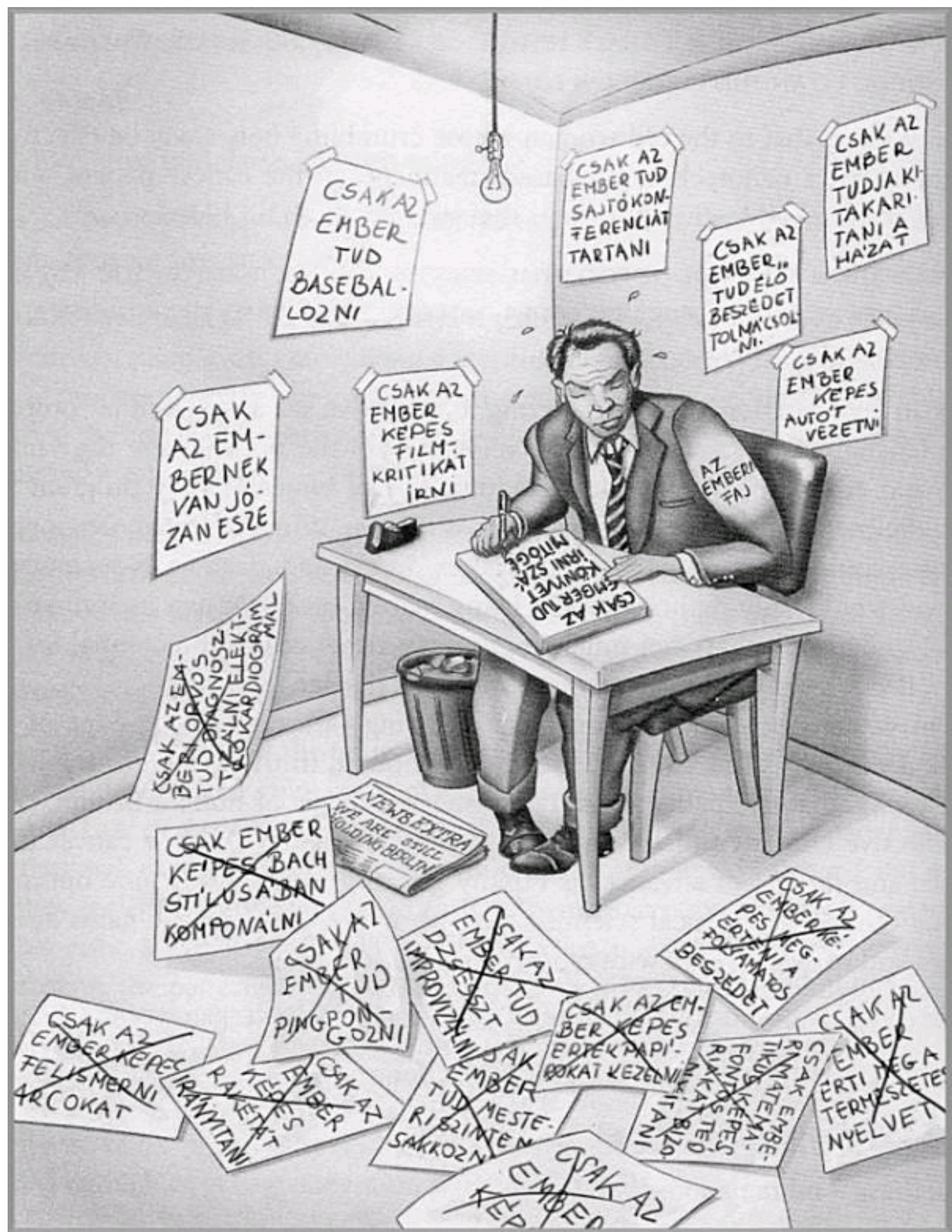
a mesterséges intelligenciánál is mélyebb értelmű fogalom.

A jó emberi sakkjáték és tételbizonyítás mögött rejlő mentális lépcsőfokok komplexek és rejtettek, miáltal a mechanikus értelmezés lehetetlennek tűnik. Azok, akik képesek követni a játékot, természetesen inkább olyan kifejezésekkel jellemzik, mint a stratégia, megértés, kreativitás és hasonló.

Amikor egy gépnek sikerül egyszerre jelentést létrehoznia és produktív meglepetést okoznia, kénytelenek vagyunk az elmével magyarázni a dolgot. Természetesen valahol a színpalak mögött programozók ülnek, akik elvileg mechanikus magyarázattal szolgálnak. De a magyarázat még számukra is elveszíti az értelmét, amint a működő program olyan részletekkel tölti meg a memóriáját, amelyek túl nagyszabásúnak bizonyulnak az emberi felfogás számára.

Ahogy az egyre emelkedő ár éri el a lakottabb magaslatokat, úgy fognak a gépek jól teljesíteni olyan területeken, amelyeket egyre többen értékelhetnek. A gépben lévő gondolkodó jelenlét elképzelése mind elfogadottabbá válik. Ha majd a legmagasabb csúcsokat is előnti az ár, a gépek olyan intelligensen beszélgetnek bármilyen tárgyról, mint az emberek. A gépek elméjének valósága akkor mindenki számára magától értetődő lesz.”

(Hans Moravec)⁽⁵⁴⁸⁾



Mivel az információs technológiák fejlődése exponenciális természetű, a teljesítmény gyakran egy szempillantás alatt válik százalmasból rémisztővé. Léteznek különböző területek, amelyeken a gyenge mesterséges intelligencia teljesítménye már ma is lenyűgöző, ahogyan a korábbi példákból is láthattuk. Az olyan intelligens feladatok tartománya, amelyekben a gépek versenyre kelhetnek az emberi intelligenciával, folyamatosan bővül. *A spirituális gépek* koracímű könyvemhez készített rajzfilmekben a védekező „emberi faj” feliratokat készít, amelyeken azok a képességek szerepelnek, amelyek csak az emberekre (és nem a gépekre) jellemzőek.^[549] A padlón szétszórva azok a feliratok láthatók, amelyeket az emberiség már eldobott, miután a gépek megtanulták ellátni ezeket a funkciókat: EKG-diagnózis, Bach stílusában komponált zenemű, arcfelismerés, rakétavezérlés, pingpongjáték, mesteri sakkjáték, értékpapír-kezelés, dzsesszimprovizáció, fontos tételek bizonyítása és folyamatosbeszéd-értés. 1999-ben ezek a feladatok már nem csak az emberi intelligencia tartományába tartoztak; a gépek is el tudták végezni őket.

Az emberiséget szimbolizáló férfi mögött a falon feliratok lógnak, amelyeket ő írt, és amelyek az emberi képességek utolsó mentsvárai: a józan ész, filmkritika, sajtókonferenciák, beszéd tolmácsolása, takarítás és autóvezetés. Ha néhány évvel később újra kellene alkotni ezt a rajzot, néhány felirat szintén a földön landolna. Amikor a CYC eléri a közismert információk százmillió tételét, talán már nem lesz olyan egyértelmű, vajon az emberek tényleg felsőbbrendűek-e a józan ész terén.

A háztartási robotok kora már elkezdődött, annak ellenére, hogy ezek a gépek ma még mindig elég kezdetlegesek. Tíz év múlva minden bizonnyal a „takarítást” is felvesszük a gépeink képességei közé. Ami az autóvezetést illeti, a robotok már majdhogynem teljesen átszelték az Egyesült Államokat közönséges utakon, átlagos forgalomban, emberi beavatkozás nélkül. Még nem adhatjuk a gépek kezébe a volánt, de komoly javaslatok foglalkoznak azzal, hogy elektronikus országutakat kellene építeni, amelyen az emberi utasokat szállító autók önmagukat fogják vezetni.

A három emberi szinten végzett természetes nyelvértési feladat – filmrecenzió írása, sajtókonferencia tartása és beszéd tolmácsolása – a legnehezebb. Ha egyszer ezeket a feliratokat is levehetjük, elmondhatjuk, hogy Turing-szintű gépeink vannak, és az erős mesterséges intelligencia ideje elkezdődött.

Ez a korszak hamarosan elérkezik. Amíg eltérések vannak az emberi és gépi teljesítmény között – olyan területek, amelyeken az emberek jobban teljesítenek, mint a gépek –, az erős mesterséges intelligenciában nem hívó szkeptikusok mindig felemlítik majd ezeket. Ám az egyes képesség- és tudásterületeken felhalmozott tapasztalataink valószínűleg követik majd Kaszparovét. A teljesítmény megítélése a szánakozóból hirtelen átvált meglepettbe, amint az egyes emberi képességek esetében elérjük az exponenciális görbe közepét.

Hogyan alkotjuk meg az erős mesterséges intelligenciát? Jelen könyv nagy része azzal a céllal íródott, hogy bemutassa az alapvető hardveres és szoftveres követelményeket, és hogy megmagyarázza, miért lehetünk benne biztosak, hogy a nem biológiai rendszerek teljesítik ezeket. A számítástechnika ár-teljesítmény-arányának exponenciális változása, amellyel elérhető az emberi intelligenciát másoló hardver, 1999-ben még ellentmondásos kérdés volt. Az elmúlt öt évben olyan sok változás történt a háromdimenziós számítástechnika technológiájának kifejlesztésében, hogy viszonylag kevés értő kritikus kételkedik ennek bekövetkeztében. Ha csak a félvezetőipar által kiadott ITRS előrejelzését vesszük, amely 2018-ig jósol, még arra az évre előre jelezhetjük az elfogadható áru emberi szintű hardvert.^[550]

Már a negyedik fejezetben elkezdtem amellett érvelni, miért gondolhatjuk azt, hogy a 2020-as évek végére részletes modelljeink és szimulációink lesznek az emberi agy minden területéről. Egészen mostanáig az agyba való bekémlelés eszközei nem rendelkeztek térbeli és időbeli dimenzióval, sávzélességgel vagy ár–teljesítmény-aránnyal ahhoz, hogy az eléggé részletes modellek megalkotásához megfelelő adatot gyűjtsenek. Ma ez is változik. A leképező és érzékelő eszközök új generációja soha nem látott pontossággal képes elemezni és kimutatni a neurális összetevőket, és teszi mindezt valós időben.

A jövő eszközei sokkal nagyobb felbontást és kapacitást tesznek majd lehetővé. A 2020-as évek végére képesek leszünk leképező és érzékelő nanobotokat küldeni az agy kapillárisaiba, hogy belülről is letapogathassuk. Már bemutattuk, hogy képesek vagyunk az agyszkenelésből és -érzékelésből nyert adatokat átvinni olyan modellekbe és számítógépes szimulációkba, amelyek biológiai megfelelőik teljesítményével összehasonlítható teljesítménnyel működnek. Már több fontos agyi területre elkészítettük erős modelljeinket és szimulációinkat. Amint azt a negyedik fejezetben taglaltam, konzervatív jóslat szerint a 2020-as évekre az agyi területeket tekintve részletes és realisztikus modellekkel fogunk rendelkezni.

Az erős mesterséges intelligencia foratókönyvének egyik egyszerű állítása az, hogy az emberi intelligencia működésének alapelveit az agyi területek visszafejtéses megismeréséből fogjuk kinyerni, és hogy ezeket az alapelveket a biológiai emberi agyénak megfelelő szintű működésre képes számítógépes platformokon fogjuk alkalmazni. Már létezik hatékony eszközkészletünk a gyenge mesterséges intelligenciához. Ezen módszerek folyamatos finomításával, az új algoritmusok kidolgozásával és a többféle módszer bonyolult architektúrákhoz való alkalmazásával a gyenge mesterséges intelligencia nem is lesz olyan gyenge. Azaz a mesterséges intelligenciát szélesebb körben alkalmazzák majd, és teljesítményük egyre rugalmasabbá válik. Az MI-rendszerek többféle megközelítésmódot fognak kidolgozni egy problémára, mint ahogyan az emberek teszik. Legfőképpen azonban az agy visszafejtésének felgyorsulásából származó ismereteink gazdagítják nagyban és folyamatosan ezt az eszközkészletet. Ez a folyamat már régen elkezdődött.

Gyakran mondják, hogy az agy nem úgy működik, mint egy számítógép, és így nem lehetséges az agyi funkciók megoldásait működő nem biológiai rendszerekre alkalmazni. Ez a nézet teljesen figyelmen kívül hagyja az önszerveződő rendszerek területét, amelyen már rendkívül kifinomult matematikai eszközökkel rendelkezünk. Mint azt az előző fejezetben kifejtettem, az agy jó pár lényeges szempontból különbözik a hagyományos, mai számítógépektől. Ha az ember kinyitja a Palm Pilotját és elvág egy kábelt, jó esélye van rá, hogy tönkreteszi a gépet. Ám mi megannyi idegsejtet és idegi kapcsolatot veszítünk el naponta bármiféle negatív következmény nélkül, mert az agy önszerveződő és szétterjedő mintákra támaszkodik, amelyekben sok specifikus részlet nem lényeges.

Amikor elérünk a 2020-as évek közepére-végére, rendkívül részletes agyi területi modellek új generációjával leszünk gazdagabbak. Eszköztárunk végül kibővül ezekkel a soha nem látott modellekkel és szimulációkkal, és teljes körű ismeretekkel fogunk rendelkezni az agy működéséről. Amint az eszköztárat intelligens feladatokra alkalmazzuk, a teljes készletre támaszkodunk majd, akár az agyvisszafejtés területéről, akár az agyról összegyűjtött ismereteinkből, akár a több évtizednyi MI-kutatás területéről.

Az agy stratégiájának egy része az információ megtanulásából áll, és nem arról van szó, hogy mint entitás a kezdetektől a hardverbe kódolt tudással indul. (Az „öszön” szót használjuk az ilyen belső tudásra.) A tanulás a mesterséges intelligenciának is fontos aspektusa lesz.

Tapasztalatom szerint a mintafelismerő rendszerek fejlesztésénél a karakterfelismerés,

beszédfelismerés és pénzügyi elemzés esetén a mérnöki munka legérdekesebb és legfontosabb része a mesterséges intelligencia tanítása. Mivel az emberi civilizáció felhalmozott tudása egyre inkább elérhető az interneten, a jövő mesterséges intelligenciái megtehetik, hogy ebbe a hatalmas tudásanyagba belépve tanulnak.

A mesterséges intelligenciák tanítása sokkal gyorsabban zajlik majd, mint a mesterségesen fel nem erősített, „hagyományos” embereké. A biológiai emberek alapoktatásához szükséges húszéves időszak sűrítendő össze csupán hetekbe vagy még kevesebbe. Továbbá, mivel a nem biológiai intelligencia képes megosztani a tanulási és tudásmintáit, csupán egy mesterséges intelligenciának kell elsajátítania minden egyes készséget. Mint már felhívtam rá a figyelmet, egy kutatási számítógépcsoportot arra képeztünk, hogy megértse a beszédet, de aztán annak a több százezer embernek, aki megvásárolta a beszédfelismerő rendszerünket, csak be kellett töltenie a már előre megtanított mintákat a számítógépébe.

A sok képesség közül, amit a nem biológiai intelligencia elsajátít majd az emberi agy visszafejtésére irányuló projekt befejeztével, az egyik legfontosabb a nyelv és a közös emberi tudás lesz, amivel végül átmegy a Turing-teszten. A Turing-teszt nem azért olyan fontos, mert gyakorlati jelentősége van, hanem azért, mert kritikus határvonalat jelöl ki. Mint már felhívtam rá a figyelmet, a Turing-teszt helyes megoldására nincsenek egyszerű megoldások, hacsak nem az emberi intelligencia rugalmasságának, kifinomultságának és hajlékonyságának meggyőző emulálása. Ha már képesek vagyunk technológiánkba olvasztani ezeket a képességeket, akkor a mérnökök feladata lesz koncentrálni és felerősíteni azt.

A Turing-tesztnek különböző változatai léteznek. Az éves Loebner-díj versenyén bronzérmet ajándékoznak annak a chatbotnak (társalkodó internetes robotnak), amelyik a legmeggyőzőbben képes elhíttetni emberi bírálóival azt, hogy ember.^{[1551](#)} Az ezüstérem annak a mesterséges intelligenciának jár, amelyik átmegy az eredeti Turing-teszten, és nyilvánvalóan ilyen eddig még nem akadt. Az aranyérem audiovizuális kommunikáción alapul. Más szóval, az adott mesterséges intelligenciának meggyőző, terminál által közvetített arccal és hanggal kell rendelkeznie, és ezért úgy kell tűnnie az emberi bírós számára, mintha egy valódi emberrel beszélgetne videotelefonon.

Látszólag az aranyérem megszerzése tűnik a legnehezebbnek. Érvelésem szerint valójában azért lehet könnyebb megszerezni, mert a bírók kevesebb figyelmet fordítanak a kommunikációban használt nyelv szövegi részére, és megtévesztheti őket egy meggyőző arc- és hanganimáció. Igazából már rendelkezésünkre áll a valós idejű arcanimáció, és bár nem felel meg a módosított Turing-követelményeknek, elég közel áll hozzá. Van már természetes hangzást előállító hangszintetizátor is, amelyet gyakran összetévesztenek emberi hangfelvételekkel, bár a prozódia (intonáción) van még fejleszteni való. Hamarabb létrehozhatunk kielégítő arcanimációt és hangképzést, mint Turing-szintű nyelvi és tudásbeli képességeket.

Turing gondosan kihagyta a pontos szabályokat tesztje megalkotásánál; kiterjedt irodalma van már annak, hogyan lehet meghatározni a megfelelő eljárásokat annak felmérésére, átmegy-e már valaki a Turing-teszten.^{[1552](#)}

2002-ben megtárgyaltam a Turing-teszt szabályait Mitch Kaporral a Long Now weboldalon.^{[1553](#)} A húszezer dolláros fogadás (melynek haszna a nyertes által választott jótékonyági célra fordítandó) alapkérdése az volt, „Leteszi-e a Turing-tesztet egy gép 2029-re?” Én igent mondtam, Kapor nemet. Hónapok alatt sikerült eljutnunk a fogadásunk megvalósításához szükséges tekervényes szabályok megalkotásáig. A „gép” és „ember” definíciók például kifejezetten sok fejtörést okoztak. Az emberi bírónak lehetnek az agyában nem biológiai folyamatok?

Ugyanakkor, lehetnek egy gépnek biológiai aspektusai?

Mivel a Turing-teszt definíciója személyről személyre változik, a tesztet teljesíteni képes gépek nem egyazon napon jelennek meg, és lesz egy időszak, amikor majd azt halljuk, a gépek átlépték a határvonalat. Ettől függetlenül ezeket a korai állításokat éppen a hozzám hasonló értő kritikusok fogják cáfolni. Mire széles körű egyetértés alakul ki a Turing-teszt letételével kapcsolatban, a tényleges határvonalat már átléptük.

Edward Feigenbaum a Turing-teszt egy változatát javasolja, amely nem egy gép azon képességét merné fel, hogy hétköznapi nyelven be tudja-e bizonyítani emberi voltát, hanem azt, hogy képes-e úgy válaszolni, mint egy bizonyos meghatározott tudományterületen működő szakértő.^[554] A Feigenbaum-teszt (FT) jelentősebb a Turing-tesztnél, mert az FT-képes, műszakilag felkészült gépek tovább tudják majd fejleszteni a saját felépítésüket. Feigenbaum a következőképpen írja le a tesztet:

„Két játékos játssza az FT-játékot. Az egyiket a természettudomány, műszaki tudományok és orvostudomány előre kiválasztott területeinek neves szakértői közül választják. (A szám lehet nagyobb, de eme kihívás esetén nem nagyobb tíznél.) Mondjuk, hogy az Egyesült Államok Nemzeti Akadémiája által lefedett területek közül választunk... Például választhatjuk az asztrofizikát, számítógép-tudományt és molekuláris biológiát. A két játékos (neves tudós és a számítógép) viselkedését minden fordulóban egy másik, az adott tudományterületen működő akadémiai tag, pl. egy asztrofizikus bírálja. A játékosok személye persze rejtve marad a bíró előtt, ahogyan a Turing-tesztben is. A bíró problémákat vázol, kérdéseket tesz fel, magyarázatokat, elméleteket kér és így tovább – mint egy kollégával tenné. El tudja dönteni az emberi bíró – a ráhibázás szintjénél nagyobb hatásfokkal –, melyikük a Nemzeti Akadémia munkatársa és melyikük a számítógép?”

Persze Feigenbaum figyelmét elkerüli a lehetőség, hogy a számítógép esetleg már az Akadémia tagja, de nyilvánvalóan azt feltételezi, hogy a gépek még nem jutottak be azokba az intézményekbe, amelyek ma még csak a biológiai embereket gyűjtik magukba. Míg úgy tűnhet, hogy az FT nehezebb, mint a Turing-teszt, a mesterséges intelligencia története rávilágít, hogy a gépek a szakemberek képességeivel indultak, és csak fokozatosan jutottak el a gyermekek nyelvi szintjére. Az első MI-rendszerek olyan szakmai területen bizonyították képességeiket, mint a matematikai tételek bizonyítása és a betegségek diagnosztikája. Ezek a korai rendszerek azonban nem mennének át az FT-n, hiszen nincsenek meg a nyelvi készségeik és a többféle nézőpontból történő, rugalmas tudásmodellezés képessége, amelyekre szükség van az FT-ben való szakmai párbeszédhez.

Ez a nyelvi készség alapvetően ugyanaz, mint ami a Turing-tesztnél is szükséges. A műszaki gondolkodás nem feltétlenül bonyolultabb, mint a legtöbb felnőtt ember által alkalmazott hétköznapi okfejtés. Úgy számítom, a gépek egy időben mennek majd át az FT-n, legalábbis néhány diszciplínát tekintve, és a Turing-teszten. Az FT letétele a tudomány minden területén valószínűleg több időbe telik majd. Ezért határozom meg a 2030-as éveket a konszolidáció időszakaként, mivel a gépi intelligencia sebesen bővíti képességeit és magába foglalja biológiai emberi és gépi civilizációnk a tudásanyagát. A 2040-es évekre lehetőségünk lesz alkalmazni civilizációnk felhalmozott tudását és képességeit a közönséges biológiai emberi intelligenciánknál milliárdszor nagyobb kapacitású számítástechnikai platformokon.

Az erős mesterséges intelligencia eljövetele az évszázad legfontosabb átalakulása lesz. Igazából

fontosságában a biológia megjelenéséhez hasonlíthatnánk. Azt fogja jelenteni, hogy a biológia egy teremtménye végül megismerte saját intelligenciáját, és felfedezte, miként kerekedhet felül saját korlátaival. Ha egyszer megértjük az emberi intelligencia működési elveit, képességeinek kiterjesztését emberi tudósok és mérnökök végzik majd, akik saját biológiai intelligenciáját nagyban erősíti egy nem biológiai intelligenciával való összeolvadás. Idővel a nem biológiai rész dominál majd.

Sokféle formában tárgyaltuk már ebben a könyvben a változás aspektusait, amelyekre a következő fejezetben részleteiben is visszatérünk. Az intelligencia a problémamegoldás képessége korlátozott erőforrások esetén, például idő híján. A szingularitást az emberi – és egyre inkább nem biológiai – intelligencia sebes ciklikussága fogja jellemezni, amely képes megérteni és eszközként használni a saját képességeit.

A FUTURISTA BAKTÉRIUM BARÁTJA IDŐSZÁMÍTÁSUNK ELŐTT KÉTMILLIÁRD ÉVVEL: *Meséld el megint az elképzeléseidet a jövőről!*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM IDŐSZÁMÍTÁSUNK ELŐTT KÉTMILLIÁRD ÉVVEL: *Nos, látom, amint a baktériumok társadalmakat alapítanak, ahol egy nagy csapat sejt alapvetően úgy működik, mint egy nagy, bonyolult, merőben felerősödött képességű organizmus.*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM BARÁTJA: *Honnan veszed ezt?*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM: *Hát már Daptobacter társaink is behatoltak nagyobb baktériumokba, hogy létrehozzanak egy kettős közösséget^[555] Elkerülhetetlen, hogy sejtjeink összetömörüljenek és minden egyes sejt specializálja a működését.*

Most úgy áll a helyzet, hogy mindent magunknak kell megcsinálni: tápanyagot találni, megemészteni és kiválasztani a melléktermékeket.

A FUTURISTA BAKTÉRIUM BARÁTJA: *És aztán mi lesz?*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM: *Ezek a sejtek kifejlesztenek valami módszert a kommunikálásra, ami túlmegy a kémiai gradiensek cserélgetésén, amit mi ketten is végzünk.*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM BARÁTJA: *Jó, most meséld el újra azt a részt, amikor tízbillió sejt gyűlik össze egyetlen superközösséggé!*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM: *Nos, igen: a modelljeim szerint körülbelül kétmilliárd éven belül egy nagy, tízbillió sejtből álló társadalom alkot majd egyetlen organizmust, amelyben több tízmilliárd specializált sejt tud egymással kommunikálni nagyon bonyolult minták alapján.*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM BARÁTJA: *Milyen minták lesznek azok?*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM: *Vegyük például a „zenét”. Ezek a nagy sejtcsoportok zenei mintákat hoznak majd létre és közlik ezeket más sejtcsoportokkal.*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM BARÁTJA: *„Zene”?*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM: *Igen, hangminták.*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM BARÁTJA: *„Hang”?*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM: *Na jó, figyelj! Ezek a supersejt-társadalmak elég bonyolultak lesznek ahhoz, hogy megértsék a saját szervezetüket. Képesek lesznek továbbfejleszteni a saját felépítésüket, egyre jobbak lesznek, és egyre gyorsabbak. A saját képükre formálják a világot.*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM BARÁTJA: *Álljunk csak meg egy pillanatra! Ezek szerint el fogjuk veszíteni alapvető baktérium mivoltunkat?*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM: *Na de valójában semmit sem veszítünk.*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM BARÁTJA: *Mindig ezt mondog, de...*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM: *Nagy előrelépés lesz. Ez a végzetünk. És egyébként is, mindig lesznek ilyen kis baktériumok, mint mi.*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM BARÁTJA: *Na jó, de mi ennek az egésznek a buktatója? Úgy értem, milyen nagy kárt tehetnek a Daptobacterek és Bdellovibrio baktériumok? Ezek a jövőbeli nagy hatású sejtcsoportosulások mindent elpusztíthatnak.*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM: *Nem bizonyos, de azt hiszem, fennmaradunk.*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM BARÁTJA: *Mindig is optimista voltál.*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM: *Nézd, még jó pár milliárd évig nem kell a buktatók miatt aggódnunk!*

A FUTURISTA BAKTÉRIUM BARÁTJA: *Rendicsek, akkor gyerünk ebédelni!*

EKÖZBEN KÉTMILLIÁRD ÉVVEL KÉSŐBB...

NED LUDD: *Ezek a jövőbeli intelligenciák rosszabbak lesznek, mint a szövőgépek, amik ellen 1812-ben harcoltam. Akkoriban csak amiatt kellett aggódnunk, hogy egy ember a géppel elvégzi tizenkettő másik munkáját. Most azonban arról beszélünk, hogy egy üveggolyó nagyságú gép az egész emberiséget túlszárnyalja.*

RAY: *Csak az emberiség biológiai részét fogja túlszárnyalni. Egyébként is, az az üveggolyó még mindig ember, ha nem is biológiai.*

NED: *Ezek a szuperintelligenciák nem vesznek majd magukhoz ételt. Nem fognak levegőt lélegezni. Nem fognak közösülés útján szaporodni... Akkor mennyiben emberiek?*

RAY: *Össze fogunk olvadni a technológiánkkal. Már most, 2004-ben elkezdődött, még ha legtöbb gépünk nincs is a testünkbe vagy az agyunkba építve. Gépeink ennek ellenére megnövelik az intelligenciánkat. A határok kitolása mindig is az emberi lét egyik velejárója volt.*

NED: *Nézd, ezekről a szuperintelligens nem biológiai lényekről azt állítani, hogy emberek, olyan, mint azt mondani, hogy alapvetően baktériumok vagyunk. Végül is belőlük fejlődöttünk ki.*

RAY: *Igaz, hogy egy mai ember sejtek csoportosulása, és hogy az evolúció termékei vagyunk, valójában annak is az élvonalában járunk. De az intelligenciánk visszafejtéssel, modellezéssel, szimulálással, nagyobb kapacitású szubsztrátumokon való újraalkotásával, valamint módosításával és kiterjesztésével való kibővítése az evolúciónk következő állomása. A baktériumok sorsa az volt, hogy technológiateremtő fajjá alakultak. És a mi sorsunk az, hogy most a szingularitás hatalmas intelligenciájává fejlődjünk.*

Hatodik fejezet

A hatások...

„A jövő belénk költözik, hogy jóval a megtörténés előtt átalakítsa magát bennünk.”

(Rainer Maria Rilke)

„A jövőről alkotott általános elképzelések egyik legnagyobb hibája, hogy velünk történik, és nem mi teremtyük meg.”

(Michael Anissimov)

„»Istent játszani« valójában az emberi természet legmagasabb szintű kinyilvánítása. Az öntökéletesítés, a környezet feletti uralom és gyermekeink lehető legjobb életpályára állításának kényszere az egész emberi történelem első számú hajtóerői. Az »Istent játszani« kényszer ezen okai nélkül nem létezne a ma ismert világ. Néhány millió ember élne a szavannákon és az erdőkben, vadászó-gyűjtögető életmódot folytatva, írás, történelem, matematika vagy a saját bonyolult univerzumuk és belső működésük megbecsülése nélkül.”

(Ramez Naam)

A hatások sokszínűsége. Milyen lesz az emberi tapasztalás jellege, mihelyt túlsúlyba kerül a nem biológiai intelligencia? Milyen következménnyel lesz az ember–gép-civilizációra, ha az erős MI és a nanotechnológia bármely általunk elképzelt terméket, szituációt és környezetet le tud majd gyártani? Azért hangsúlyozom a képzelet szerepét, mert képzeletünk még mindig korlátozni fog az alkotásban, viszont a képzeletet valósággá formáló eszközeink az exponenciális növekedés hatására egyre hatékonyabbá válnak.

A szingularitás közeledtével ismét fontolóra kell vennünk az emberi élet milyenségére vonatkozó elképzeléseinket, és újra kell tervezni intézményeinket. Ebben a fejezetben ezekből az elképzelésekből és intézményekből veszünk néhányat górcső alá.

Például a „G”, „N” és „R” egymásba fonódó forradalmi emberi testünk törékeny 1.0-s változatát sokkal tartósabb, többre képes 2.0-s hasonmásokká alakítják át. Nanobotok milliárdjai fognak mozogni testünk és agyunk véráramában. A testben megsemmisítik a kórokozókat, kijavítják a DNS-hibákat, eltávolítják a káros anyagokat, egészségünk javítását célzó feladatok sokaságát végzik el, és mindezek következtében meghatározatlanul hosszú ideig élhetünk öregedés nélkül.

Agyunkban a masszívan elosztott nanobotok interakcióba lépnek biológiai idegsejtjeinkkel, lehetővé teszik – az összes érzékszervre és az érzelmek idegrendszeren belüli megfelelőire is vonatkozó – teljes alámerülést a virtuális valóságban. De még ennél is fontosabb, hogy a biológiai gondolkodás és az általunk létrehozott nem biológiai intelligencia közötti bensőséges kapcsolat alaposan kitágítja az emberi intelligenciát.

A hadviselés nanobotalapú lesz, és a kiberfegyverek felé tolódik el. A tanulás először az online

környezetre tevődik át, de mihelyt az agyunk is online lesz, új ismereteket és készségeket is le tudunk tölteni. A munka szerepe – a zenétől és a művészetektől a matematikáig és a tudományokig – mindenféle tudás létrehozása lesz. A játék ismereteket teremt, így nem lesz nyilvánvaló különbség munka és játék között.

Az intelligencia exponenciális növekedése a Földön és a Föld körül is addig a pontig folytatódik, amíg el nem érjük az intelligens számításokhoz szükséges anyag és energia korlátait. Mihelyt a galaxis általunk ismert sarkában megközelítettük ezt a határt, civilizációnk intelligenciája, hamar elérve a lehető leggyorsabb sebességet, az univerzum maradékára is kiterjed. Ezen a sebességen a fénysebességet értjük, de egyes elképzelések szerint (például féregjáratokon keresztüli rövidebb utakkal számolva) talán az is kijátszható.

...az emberi testre

„Oly sok különböző ember van.”

(Donovan)⁽⁵⁵⁶⁾

„Kozmetikai bébi, csatlakozz belém! / És soha, soha ne keress mást. / És rájövök, senki sem igazán jó / Plasztik-fantasztik szeretőmnek.”

(Jefferson Airplane: Plastic Fantastic Lover)

„A gépeink nagyon hasonlóká válnak hozzánk, és mi még hasonlóbba válunk a gépeinkhez.”

(Rodney Brooks)

„Lelkem többé, levetvén testemet, semmi természeti formát nem ölt; de milyet görög aranyművesek keze zománc-aranyból remekelt.”

(William Butler Yeats,

„Hajózás Byzantiumba” – Jékely Zoltán fordítása)

A biotechnológiát és a szárnyait bontogató génmérnökséget alkalmazva már dolgozunk testünk fizikai és mentális rendszereinek radikális feljavításán. A következő két évtized után olyan nanomérnöki módszereket is képesek leszünk használni, mint például a szervek bővítésében és végül helyettesítésében segédkező nanobotok.

Új táplálkozási mód. A szex nagymértékben elvált biológiai funkciójától. Szexuális aktivitásunk leggyakrabban az intim kommunikációt és az érzéki örömeket, és nem a szaporodást célozza. Ennek megfelelően, különféle módszereket dolgoztunk ki csecsemők létrehozására anélkül, hogy valódi szexuális együttlétre kerülne sor. A szaporodás viszont általában még mindig szexuális aktus következménye. A szex kiszabadítását biológiai funkciójából a társadalom nem minden rétege nézi jó szemmel, de a fejlett világ közvéleménye gondolkodásában készségesen, sőt buzgón elfogadta.

De miért ne gondoskodnánk arról is, hogy egy másik, szociálisan szintén bensőséges, érzéki örömmel járó tevékenységünket, nevezetesen az étkezést is kiszabadítsuk a biológia fogságából? Az ételfogyasztás eredeti biológiai rendeltetése a vérkeringés ellátása volt sejteink trillióiba eljuttatott tápanyagok útján. Ezek a tápanyagok kalóriákat (energiát) adó alapanyagokat, például (főként

szénhidrátokból származó) szőlőcukrot, fehérjét, zsírokat és miriádnyi nyommolekulát – vitaminokat, ásványokat, valamint a szerteágazó metabolikus folyamatokban az enzimek építőkockáiként szolgáló növényi eredetű vegyületeket – tartalmaznak.

Az ember bármely más fontos biológiai rendszereihez hasonlóan az emésztés is döbbenetesen bonyolult. A drasztikusan változó körülmények ellenére lehetővé teszi, hogy testünk hozzájusson a túléléshez szükséges komplexvegyületekhez, miközben ezzel egy időben mérgező anyagok sokaságát szűri ki belőle. Az emésztés alapjait képező bonyolult folyamatokra vonatkozó ismereteink annak ellenére gyorsan bővülnek, hogy még mindig sok mindent nem értünk belőle teljesen.

Azt viszont tudjuk, hogy különösen az emésztési folyamatok az evolúciós fejlődésünk mostanától drámaian eltérő szakaszára optimalizáltak. A történelem során a következő gyűjtögető vagy vadász- (és nem olyan régóta a vetési)-évad nagy valószínűséggel magában rejtette a gyászos véget. Érthető, hogy a test annyira ragaszkodik minden lehetséges elfogyasztott kalóriához. Ez a biológiai stratégia viszont manapság már kontraproduktív, és felelős napjaink járványáért, az elhízásért, hozzájárul a test leépülésével járó olyan bajokhoz, mint a koszorúér-betegségek vagy a 2-es típusú cukorbetegség. Az ide vezető kóros folyamatokat segítő, elavult metabolikus programozás vált belőle.

Gondoljunk bele: emésztésünk és testünk más rendszereinek tervezési elvei távolról sem optimálisak a mai feltételek mellett! Evolúciós időskálán nézve a legutóbbi időkig a fajnak nem fűződött érdeke ahhoz, hogy a hozzám hasonlóan idős személyek (1948-ban születtem) elhasználják a klán korlátozott erőforrásait. Az evolúció a rövid élettartamot részesítette előnyben (a születéskor várható élettartam két évszázaddal ezelőtt 37 év volt), lehetővé téve, hogy a szűk források a róluk gondoskodó, komoly fizikai munka elvégzéséhez eléggé erős fiatalokat szolgálják. Mint ahogy korábban tárgyaltuk, az úgynevezett „nagy-mama-hipotézis” (a törzs néhány „bölcse”, idős tagja hasznos volt az emberi faj számára) különösebben nem kérdőjelezi meg azt az észrevételt, mely szerint a génekre nem nehezedett az emberi élettartamot jelentősen növelő, erős szelekciós nyomás.

A nagy anyagi bőség korában élünk (legalábbis a technológiailag fejlett nemzetek). A legtöbb munka inkább szellemi erőfeszítést, mint fizikai megerőltetést igényel. Száz éve az Egyesült Államok munkaerejének 30%-át farmokon, egy másik 30%-át pedig gyárakban alkalmazták. Ma mindkét szám 3% alatti^{[\[557\]](#)}. A repülésirányítótól a webtervezőig sok mai munkatípus egyszerűen még nem létezett száz éve. 2004 körül sokkal inkább lehetőségünkben áll, mint gyerekkorunkban, hogy hozzátegyünk valamit civilizációnk exponenciálisan növekvő tudásbázisához, ami mellékesen fajunk egyik sajátossága. (Mint a második világháború utáni korszak gyermekének, nekem legalábbis ez a véleményem.)

A technológia által, gyógyszerekkel, kiegészítőkkel, virtuálisan az összes testi rendszer helyettesítésével és sok más beavatkozással fajtánk megnövelte a természetes élettartamát. Rendelkezésünkre állnak a csípőt, térdet, vállat, könyököt, csuklót, állkapcsot, fogakat, bőrt, artériákat, vénákat, szívbillentyűket, kart, lábat, ujjat és lábujjat helyettesítő eszközök, és bonyolultabb szerveket (például a szívet) pótló rendszereket is elkezdtek már használni. Az emberi test és agy sebészetének alapelveit megtanulva hamarosan lehetőségünkben áll összehasonlíthatatlanul jobb, tartósabb és magasabb szintű teljesítményre képes, meghibásodásra, betegségre és öregedésre nem hajlamos rendszereket istervezni.

A művész és kulturális katalizátor Natasha Vita-More^{[\[558\]](#)} *Primo Posthumanje* ilyen rendszer konceptuális tervét példázza. A mozgékonyt, hajlékonyt és a szuperhosszú élettartamot hivatott optimalizálni. Olyan jellegzetességeket szemléltet, mint a világméretű hálózati kapcsolatra alkalmas nanobotokkal összefonódott MI-beültetéssel bíró meta-agy, a napsütéstől védett, a szint és a

textúrát megváltoztató bioérzékelőkkel rendelkező intelligens bőr, valamint a rendkívül kifinomult érzékek.

Bár az emberi test 2.0-s változata folyamatban lévő, végeredményét tekintve az összes fizikai és mentális rendszerünket radikálisan feljavító nagy projekt, egyszerre csak egy-egy kicsi és jóleső lépést valósítunk meg belőle. Jelenlegi ismereteinkből kiindulva, a látomás összes aspektusának megvalósításához szükséges eszközöket fel tudjuk vázolni.

Az emésztőrendszer áttervezése. Ebből a nézőpontból megközelítve térjünk vissza az emésztőrendszer áttekintéséhez! Az elfogyasztott élelmiszer összetevőiről már van átfogó képünk. A táplálékot intravénásan beadva tudjuk, mit tegyünk azokkal, akik már a pusztán túlélésüket sem képesek biztosítani evéssel. Mindazonáltal, mivel a különböző anyagokat véráramba juttató, illetve onnan kiszűrő technológiák még elég korlátozottak, egyértelmű, hogy nem ez az óhajtott alternatíva.

A feljavítás következő lépése főként biokémiai lesz. Gyógyszerek és kiegészítők formájában valósul meg, felesleges kalóriák felszívódását hivatott megelőzni, illetve a metabolikus útvonalak egészséget optimalizáló újraprogramozását célozza. Dr. Ron Kahn (Joslin Cukorbetegség Központ) már azonosította az elhízásért felelős, a zsírsejtbeli zsírfelhalmozódást irányító inzulinreceptor génjét (FIR). Kahn úttörő kutatása – egerek zsírsejtjeiben akadályozva meg e gén kifejeződését – bebizonyította, hogy az ilyen állatok korlátlanul bármennyit ehetnek, soványak és egészségesek maradnak. Kísérleti egerei sokkal többet ettek, mint az FIR-gén működésében nem akadályozott egerek, mégis 18%-kal tovább éltek, és jóval kevesebben szenvedtek közülük szívbetegségektől, cukorbetegségtől. Nem meglepő, hogy gyógyszeripari cégek keményen dolgoznak a kutatási eredmények emberi FIR-génre történő alkalmazásán.

A köztes szakaszban, az emésztőszervekben és a véráramban nanobotok válogatják majd ki intelligensen azokat a meghatározott tápanyagokat, amelyekre szükségünk van, járulékos és kiegészítő táplálékokat rendelnek hozzájuk személyes, vezeték nélküli helyi hálózatunkon keresztül, míg a fennmaradó anyagokat továbbküldik megsemmisítésre.

Ha futurisztikusnak tűnik is, ne feledkezzünk meg arról, hogy az intelligens gépek már útban vannak véráramunk felé. Többtucatnyi jelenleg futó projektben készítenek véráramalapú BioMEMS-rendszereket széles körű diagnosztikai és gyógyászati alkalmazások céljára.^[559] Ahogy említettem, több fontos konferenciát is szentelnek ezeknek a projekteknek.^[560] A BioMEMS-eszközöket kórokozók intelligens felderítésére, gyógyszerek pontos szállítására fejlesztik.

A hormonokat, például inzulint szállító és vérben utazó nanotervezésű eszközök működését állatokon mutatták be.^[561] Hasonló rendszerek pontosan juttathatják el a dopamint Parkinson-kóros betegek agyába, vérzékenységben szenvedők szervezetében véralvadást gyorsító szereket továbbíthatnak, és közvetlenül a tumorgócokra irányíthatnak rákgyógyszereket. Az egyik új tervben húsz anyagot tartalmazó, rakományukat időre és helyre nézve programozottan szállító tartályokkal találkozunk.^[562]

Kensall Wise, a Michigan Egyetem villamosmérnök-professzora idegi alapú megbetegedésben szenvedők elektromos tevékenységét pontosan monitorozó, parányi neurális szondát fejleszt.^[563] Gyógyszereknek az agy precízen meghatározott területeire való eljuttatásával kapcsolatban is várhatók jövőbeli tervek. Isijama Kazusi (Tóhoku Egyetem, Japán) kicsi rákos daganatokba gyógyszert szállító, mikroszkopikus fűrőt használó mikrogépeken dolgozik.^[564]

A Sandia Nemzeti Laboratóriumban különösen innovatív mikrogépet fejlesztettek: a mikrofogazatból és állkapocsból álló szerkezet kinyílván és becsukódva válik alkalmassá egyedi

sejtek csapdába ejtésére, majd különböző anyagok, például DNS, fehérjék és hatóanyagok sejtbe ültetésére.^[565] Sok megközelítést dolgoznak ki a testbe és a véráramba juttatott mikro- és nanoszintű gépekre is.

Végül meg tudjuk majd határozni a minden egyes személy optimális egészségéhez szükséges pontos tápanyagokat (köztük az összes, több száz növényi eredetű vegyületet is). Szabadon és olcsón hozzájuk juthatunk, és így már egyáltalán nem kell azzal törődnünk, hogy élelmiszerekből nyerjük ki őket.

A tápanyagokat speciális metabolikus nanobotok fogják közvetlenül a véráramba juttatni, miközben a vérben és testünkben lévő érzékelők vezeték nélkül kommunikálva dinamikus információt szolgáltatnak a mindenkor szükséges táplálékról. E technológiának a 2020-as évek végére eléggé kiforrottá kellene válnia.

E rendszerek tervezésének egyik kulcskérdése: hogyan juttatjuk be a nanobotokat a testbe, és hogyan távolítjuk el őket onnan? A mai technológiák, mint például intravénás katéterek használata, sok kívánnivalót hagynak maguk után. A gyógyszerektől és táplálékkiegészítőktől eltérően a nanobotoknak van egyfajta intelligenciájuk, számon tartják, mi található a leltárunkban, és okosan, ügyesen be- és kicsúsznak testünkbe. Az egyik forgatókönyv szerint az övünkön vagy a trikónkon fogunk a testbe bőrön vagy más testüregeken keresztül bejutó, táplálékot szállító, nanobotokkal feltöltött speciális tápanyagkészüléket hordani.

A technológiai fejlődés ezen állapotában képesek leszünk azt enni, amit csak akarunk, ami gyönyört és gasztronómiai elégedettséget okoz. Ízükért, textúrájukért és aromájukért derítjük majd fel a kulináris műremekeket, miközben a véráramban a tápanyagok optimálisan keringenek. Az egyik megvalósulási lehetőség, hogy az elfogyasztott összes élelem egy a vérárambeli felszívódását meggátoló módosított emésztési területen halad keresztül. A vastagbél és a bél működését viszont ez megterhelné, úgyhogy sokkal kifinomultabb megoldás lenne, ha elállnánk a salakanyagok eltávolításának hagyományos módszereitől. Szeméprésgéphez hasonlóan működő, speciális eltávolító nanobotokkal pótolhatnánk ezeket a funkciókat. Mihelyt a táplálékkal foglalatosskodó robotok bejutottak a testbe, az eltávolító robotok a másik irányba indulnának el. Ehhez hasonló találmányokkal a vért szennyeződésmentesítő és tisztító szervekre, például a vesére sem lenne szükség.

Végül különleges ruhákkal vagy nyilvánvaló táplálékforrásokkal sem kell majd törődnünk. Ahogy a számítástechnika is mindenhol ott lesz, a nélkülözhetetlen metabolikus nanobotforrások is a környezetünkbe lesznek beágyazva. De az is fontos, hogy a testen belül is tartsunk fenn bőséges tartalékokat az összes szükséges anyagból. A test 1.0-s változata nagyon korlátoltan teszi ezt – például a vérben csak néhány percre elég oxigént tárol, míg a glikogénben és más tartalékokban lévő kalória, energia mindössze pár napra elegendő. A 2.0-s változat lényegesen nagyobb tartalékokkal rendelkezne, biztosítva, hogy a metabolikus forrásoktól sokkal hosszabb ideig is el lehessünk választva.

Magától értetődően, a technológia bevezetésekor az ódivatú emésztési folyamattól nem szabadulunk meg mindannyian, hiszen a szövegszerkesztők első generációjának bevezetése után sem dobta ki mindenki az írógépet. Ugyanakkor ezek az új technológiák a megfelelő időben uralkodókká válnak majd. A régiséggel való szándékos törekvések kivételével kevesen használnak ma írógépet, lovat és bricskát, fatüzelésű kályhát vagy más kifutott technológiát. Ez a jelenség megy majd végbe az újratervezett testekkel is. Mihelyt megoldjuk a radikálisan újratervezett gyomor- és bélrendszerrel járó elkerülhetetlen bonyodalmakat, egyre jobban kezdünk bízni bennük. A nanobotalapú emésztőrendszer fokozatosan kerül bevezetésre, először az emésztési terület bővül ki.

Teljes kicserélése viszont csak számos iteráció után történhet meg.

Programozható vér. Vérünk az egyik olyan átható rendszer, amely már tárgya a visszafejtésen alapuló, átfogó konceptuális újratervezésnek. Korábban említettem Rob Freitas vörösvértestjeink, vérlemezkéink és fehérvérsejtjeink helyettesítését célzó nanotechnológia-alapú terveit.^[566] Mivel a legtöbb biológiai rendszerünkhöz hasonlóan a vörösvértestek is csekély hatékonysággal végzik el oxigénellátó feladatukat, Freitas újratervezte őket, hogy optimális teljesítménnyel működjenek. Respirocitái (robotikus vörösvértestjei) lehetővé teszik, hogy órákon keresztül életben maradjunk oxigénbevitel nélkül.^[567] Érdekes lesz megfigyelni, hogy sportversenyeken hogyan viszonyulnak majd a fejlesztéshez. A respirociták és hasonló rendszerek feltételezhetően be lesznek tiltva az olyan rendezvényeken, mint az olimpiai játékok, viszont szemtanúi leszünk annak is, hogy respirocitákkal feldúsított vérű tizenévesek jobb teljesítményt nyújtanak az olimpikonoknál. A prototípusokra ugyan még egy-két évtizedig várhatunk, a fizikai és kémiai követelményeket viszont már lenyűgöző részletességgel kidolgozták. Elemzések kimutatták, hogy a Freitas terveiben szereplő robotok százszor, ezerszer jobban tárolnák és szállítanák az oxigént, mint a biológiai vér.

Freitas a biológiai megfelelőknél ezerszer gyorsabb homeosztázist és vérzésselállást eredményező, mikronméretű mesterséges vérlemezkéket^[568] is elképzelt, valamint olyan nanorobotikus „mikrobaevőket” (a hagyományos fehérvérsejtek helyett), amelyek mindig az adott fertőzés elleni harchoz megfelelő szoftvert töltenek le, és ezerszer gyorsabban lépnek működésbe, mint az antibiotikumok, hatékonyan véve fel a harcot minden bakteriális, vírusos, gombás fertőzéssel, vagy a rákkal, tekintet nélkül azok esetleges gyógyszer-rezisztenciájára.^[569]

Legyen szíved, vagy ne legyen? A feljavításlistán lévő következő szerv a szív, amely noha bonyolult és hatékony gép, sok súlyos problémával küzd. Miriádnyi módon hibásodhat meg, potenciálisan hosszú életünk egyik alapvetően gyenge pontja. A test többi részével összehasonlítva általában sokkal hamarabb, gyakran idő előtt lerobban.

Noha a műszívek lassan már alkalmazható pótmegoldások, hatékonyabb megközelítéssel, úgy ahogy van, megszabadulhatunk a szívtől. Freitas tervei között találunk saját mobilitásukról gondoskodó, önmeghajtó nanorobotikus vértesteket is. Ha a vér önállóan mozog, kiküszöbölhetők a központi pumpáláshoz szükséges rendkívüli nyomás következtében fellépő, mérnöki jellegű problémák is. A vérellátásban használt nanobotok működését tökéletesítve végül folyamatosan ki is cserélhetjük őket. Freitas közzétett egy olyan tervet is, amelyben a teljes emberi véráramot egy „vaszkuloida” nevű, ötszázbillió nanobotból álló komplex rendszer helyettesíti a lényeges tápanyagok és sejtek nemfolyadék alapú szállításában.^[570]

A testet hidrogént, vagy eredeti biológiai „tüzelőanyagát”, ATP-t használó mikroszkopikus „üzemanyagcellák” fogják energiával ellátni. Mint ahogy az utolsó fejezetben írtam, mostanában komoly fejlődés tapasztalható a MEMS- és a nanosintű „üzemanyagcellák” területén, idesorolva azokból is néhányat, amelyek a test szőlőcukor- és ATP-energiaforrásait használják.^[571]

A tüdőt az oxigénellátást jócskán feljavító respirocitákkal, oxigént szolgáltató és a szén-dioxidot eltüntető nanobotokat használva tudjuk kiváltani. Más rendszerekhez hasonlóan ezúttal is köztes állapotokon megyünk keresztül, amelyek során a technológia egyszerűen csak kiterjeszti a természetes folyamatokat, és így mindkettőből a világ legjobbját birtokolhatjuk. De végül nem lesz ok arra, hogy a tüdők megmaradjanak. Ha pedig kellemesnek tartjuk a levegővételt, virtuális megoldásokat is kidolgozhatunk eme érzékszervi élmény átéléséhez.

Idővel nem lesz szükségünk különféle, a vérben és más metabolikus utakon áramló vegyi anyagokat, hormonokat és enzimeket termelő szervekre. Sok ilyen anyag biológiailag azonos változatát már ma tudjuk szintetizálni, két évtizeden belül pedig képesek leszünk rutinszerűen legyártani a biokémiaiilag releváns anyagok túlnyomó többségét. Ma is készítünk mesterséges hormonszerveket. A Lawrence Livermore Nemzeti Laboratóriumban és a kaliforniai székhelyű Medtronic MiniMednél például bőr alá beültetendő mesterséges hasnyálmirigyet fejlesztenek. Ez számítógépes programot használva, hasnyálmirigysejtjeink inzulintermelő szigetecskéihez hasonlóan működne, és a vércukorszintet figyelve adagolná a pontos inzulinmennyiséget.^[572]

Az emberi test 2.0-s változatában, intelligens bio-visszacsatolási rendszerek által irányított nanobotok szolgáltatják majd az óhajtott szint fenntartása és kiegyensúlyozása céljából a hormonokat és a velük összefüggő anyagokat (annyira, amennyire még szükségünk lesz rájuk). Mivel biológiai szerveink többségétől megszabadulunk, ezeknek az anyagoknak a nagy részére nem lesz szükségünk; a nanorobotikus rendszer által nélkülözhetetlennek tartott más forrásokkal lesznek helyettesítve.

Akkor mi marad? Tételezzük fel, hogy a korai 2030-as években vagyunk! Eltávolítottuk a szívet, tüdőt, a vörös- és fehérvérsejteket, vérlemezkéket, hasnyálmirigyet, pajzsmirigyet és az összes hormontermelő szervet, vesét, húgyhólyagot, májat, alsó nyelöcsövet, gyomrot, a vékony- és vastagbelet. A csontváz, a bőr, a nemi szervek, az érzékszervek, a száj, a felső nyelöcső és az agy maradt meg.

A csontváz szilárd szerkezet, és már elég jól értjük a működését. Egyes részeit (például mesterséges ízületekkel) már ma is helyettesíthetjük, bár a művelet fájdalmas sebészi beavatkozással jár, és a kivitelezésnél használt jelenlegi technológiának komoly korlátai vannak. Nanobotok összekapcsolásával egy napon azonban lehetővé válik a csontváz fokozatos, beavatkozást nem igénylő feljavítása, végső fokon pedig a kicserélése. Az emberi csontváz 2.0-s változata erős, szilárd és önjavító lesz.

A műtétet közvetlenül nem tapasztaljuk meg, így nem vesszük észre sok szervünk, például a máj és a hasnyálmirigy hiányát. Viszont az elsődleges és másodlagos nemi szerveinket burkoló bőrt, valamint kommunikációs és élvezeti alapfunkcióit mindenképpen meg akarjuk majd tartani. Mindemellett a bőrt végre fizikai és hőhatásoktól védő, bensőséges kommunikációs adottságainkat növelő, nanotervezésű, alkalmazkodó anyagokkal tökéletesíthetjük. Ugyanez vonatkozik az étkezésnél használt emésztőrendszer fennmaradt részeire, a szájra és a felső nyelöcsőre is.

Az emberi agy áttervezése. Mint ahogy korábban tárgyaltuk, a visszafejtés és újratervezés folyamata körbeveszi testünk legfontosabb rendszerét: az agyat. Már léteznek „neuromorf” modellezésen (az emberi agy és idegrendszer visszafejtésén) alapuló implantátumok. Az érintett agyterületek listája gyorsan bővül.^[573] Az MIT és a Harvard kutatói a sérült retinát helyettesítő implantátumokat fejlesztenek.^[574] Parkinson-kóros páciensek rendelkezésére állnak a ventrális poszterior mag és a szubtalamuszi agyi régiókkal közvetlenül kommunikáló implantátumok. A betegség legpusztítóbb tüneteinek visszafordítása a cél.^[575] Az agybénulásban vagy multiplex sclerosisban szenvedők implantátuma a ventrális laterális talamusszal kommunikál, sikeresen kontrollálja a remegést.^[576] „Ahelyett, hogy az agyat levesként kezelnénk, egyes ingerületátvivő anyagokat (neurotranszmittereket) erősítő vagy elnyomó vegyi anyagokat hozzáadva, inkább áramkörként fogjuk fel”, mondja az e gyógymódok úttörő munkáiban segítő amerikai orvos, Rick

Trosch.

Változatos technikákat fejlesztenek a biológiai információfeldolgozás nedves-analóg világa és a digitális elektronika közti kommunikációs híd létrehozására is. A németországi Max Planck Intézet kutatói idegsejtekkel mindkét irányban kommunikáló, sebészeti beavatkozást nem igénylő eszközöket dolgoznak ki.^[577] „Neurontranzisztorukat” élő pióca mozgását irányító személyi számítógéppel demonstrálták. Hasonló technológiát használnak pióca-idegsejtek „áramkörökbe” szervezésére, majd egyszerű logikai és aritmetikai problémák megoldására.

Tudósok kísérleteznek „kvantumpöttyökkel” – fotoinduktív (fényre reagáló) félvezető anyagot tartalmazó parányi chipekkel – is, amelyeket olyan peptidekkel vonnak be, amelyek képesek az idegsejtek felszínének meghatározott pontjaihoz kötődni. Ezzel lehetővé válik, hogy a kutatók az adott hullámhosszú fény segítségével (például gyógyszeradagolásnál) távolról hozzanak működésbe egyes idegsejteket, kiiktatva a beavatkozást igénylő külső elektródákat.^[578]

Az ilyen fejlesztések ideg- és gerincvelő-károsult személyek megrongált idegpályái újbóli összecsatolásával is kecsegtetnek. Sokáig azt hittük, hogy ezek a járatok, mivel a nem használt idegek fokozatosan sorvadnak, csak nemrég megsérült betegek esetében állíthatók helyre. Egy friss felfedezés viszont kimutatta, hogy a régóta sérült gerincvelőjű betegekbe is beültethetők mesterséges neurális rendszerek. A Utah Egyetem kutatói hosszú ideje mind a négy végtagjukon lebénult betegeket lábuk különféle képpen történő mozgatására utasítottak, majd mágnesesrezonancia-képalkotással (MRI) vizsgálták az agyi reakcióikat. A lábak idegpályái ugyan évek óta inaktívak voltak, az agytevékenység lábmozgatási kísérletek közbeni mintázatai viszont nagyon közeli hasonlóságot mutattak az egészséges személyeknél megfigyelttel.^[579]

Lehetőségünk lesz arra is, hogy a mozgásokra irányuló szándékhoz köthető agyi mintázatok felismerésére és izomtevékenységek megfelelő sorozatának stimulálására programozott érzékelőket tegyünk a lebénult személyek agyába. Már elkészültek olyan „nano-elektromechanikus rendszerek” (NEMS) tervei, amelyek kifejezetten azokat a betegeket célozzák meg, akiknek az izmai egyáltalán nem működnek. Ezek a rendszerek képesek kitágulni és összehúzódni, felváltva a sérült izmokat, és akár valódi, akár mesterséges idegekkel aktiválhatóak.

Kiborgokká válunk. Az emberi test 2.0-s változatának forgatókönyve egy régi trend folytatása, mely során egyre bensőségebb kapcsolatba kerülünk a technológiánkkal. A számítógépek kezdetben távoli, hatalmas gépek voltak, amelyeket légkondicionált termekben őriztek és kezeltek fehér köpenyes technikusok. Aztán az íróasztalunkra, majd a karunk alá költöztek, most meg a zsebünkben vannak. Hamarosan rutinszerűen berakjuk őket a testünkbe és az agyunkba. 2030-ra inkább leszünk nem biológiaiak, mint biológiaiak. Mint ahogy a harmadik fejezetben tárgyaltam, 2040-re a nem biológiai intelligencia többmilliárdszor nagyobb lesz a biológiaiainál.

A súlyos betegségek és a rokkantság legyőzésének csábító nyeresége gyors fejlődési pályát fog biztosítani ezeknek a technológiáknak, ám az orvosi alkalmazások még az elterjedésük korai szakaszában vannak. Mihelyt meghonosodnak a technológiák, megszűnnek az emberi lehetőségek mérhetetlen kiterjesztésének akadályai.

Stephen Hawking nemrég megjegyezte a német *Focus* magazinban, hogy a számítógépes intelligencia néhány évtizeden belül felülmúlja az emberit. Azt javasolta, hogy „sürgősen közvetlen kapcsolatokat kell fejleszteni az agy felé, hogy a számítógépek inkább kiegészítsék az emberi intelligenciát, s ne szemben álljanak azzal.”^[580] Hawking nyugodt lehet, hiszen a javasolt fejlődési program folyamatban van.

Az emberi test 2.0-nak sok változata lesz; minden egyes szerv, testi rendszer saját fejlődési, finomítási utat jár be. A biológiai evolúció csak „helyi optimalizálásra” képes, azaz ugyan javítja a tervet, de kizárólag a biológiailag nagyon régen megfogalmazott „tervdöntések” korlátai között. Például építsen fel bármit is, mindig csak korlátozott típusú anyagokkal dolgozhat – név szerint a fehérjékkel, amelyek az aminosavak egydimenziós húrjaiból csavarodnak össze. Csupán rendkívül lassú kémiai kapcsolatokon alapuló gondolkodási folyamatokat használhat (a mintafelismerés, logikai analízis, készségek kialakítása és más kognitív készségek terén). És a biológiai evolúció ráadásul nagyon lassú is, csak járulékosan javít a felsorolt alapelképzelések alkalmazását továbbvivő terven. Képtelen ugrásszerűen változtatni, például gyémántból készített szerkezeti anyagokra vagy nanocsőalapú logikai kapcsolókra váltani.

Ezeket az inherens korlátokat azonban meg lehet kerülni. A biológiai evolúció létrehozott ugyanis egy gondolkodásra és környezete átalakítására képes fajt. Ennek a fajnak most sikerül megismernie és kijavítania a saját tervét, ráadásul képes felülvizsgálni és átalakítani a biológiai alapdogmákat is.

Az emberi test 3.0-s verziója. Úgy képzelem, az emberi test 3.0-t – a 2030-as és 2040-es években – sokkal radikálisabban alakítjuk majd ki. Minden egyes alrendszer újraformálása helyett – gondolkodásunk biológiai és nem biológiai részének együttes alkalmazásával – lehetőségünk lesz átalakítani testünket a 2.0-s változat tapasztalatai alapján. Az 1.0-ból a 2.0-ba való átmenethez hasonlóan a 3.0-ba való átmenet is fokozatos lesz, sok egymással versengő elképzeléssel.

A 3.0-s változat egyik tulajdonságaként a test megváltoztathatóságát képzelem el. Ezt virtuálisvalóság-környezetekben (lásd a következő fejezetet) nagyon könnyen meg tudjuk majd tenni, de azok az eszközök is rendelkezésünkre fognak állni, amelyekkel a tényleges valóságban is kivitelezhetjük. Az MNT-alapú (molekulárisnanotechnológia-alapú) gyártás magunkba integrálásával gyorsan, tetszés szerint módosíthatjuk majd fizikai megjelenésünket.

Annak fényében, milyen hatással van az esztétika az emberi agyra, valószínűleg nagyrészt nem biológiai agyunkkal is méltányolni fogjuk az emberi testek esztétikai és érzelmi fontosságát. (Intelligenciánk nem biológiai részei bővített állapotban is a biológiai ember intelligenciájából származnak majd.) Tehát az emberi test 3.0 a mai szabványok szerint emberinek fog tűnni, viszont mivel sokkal formálhatóbb lesz, az idő előrehaladtával kitágul majd a szépségről alkotott elképzelésünk. Az emberek piercinggel, tetoválással, plasztikai sebészettel már ma is kiegészítik, formálják testüket. Ezek a változások társadalmilag egyre elfogadottabbak. Mivel módunkban áll majd, hogy könnyen visszafordítható változtatásokat végezzünk, valószínűleg sokkal nagyobb lesz a kísérletező kedv.

J. Storrs Hall olyan, általa „*fogleteknek*” (kb. „önszervező nanobotok felhőjének” az angol *fog* [köd] szó nyomán – *a szerk.*) elnevezett nanobotokról írt, amelyek egymással összekapcsolódva sokféle struktúrát képesek létrehozni, és gyorsan át tudják alakítani ezeknek a struktúráknak a felépítését. Azért nevezi őket *fogleteknek*, mert ha kellő sűrűségben vannak jelen egy területen, képesek különböző hang- és vizuális hatásokat létrehozni a hang és a fény manipulálásával. Lényegében külső (azaz fizikai világbeli), nem pedig belső (idegrendszerbeli) virtuálisvalóság-környezeteket hoznak létre. Egy személy képes módosítani velük a testét vagy a környezetét – habár, mivel a *fogletek* a hangot és a képeket kontrollálják,^{[15811](#)} e változások egyik-másika valójában csak illúzió. Hall *fogletjei* konceptuális szinten olyan valódi, képlékeny testeket képesek létrehozni, melyek felveszik a versenyt a virtuális valóságbeli testekkel.

BILL (KÖRNYEZETVÉDŐ): *Ezzel az emberi test 2.0-s cuccal – a szó szoros értelmében – nem dobod ki a gyereket is a fürdővízzel együtt? Az egész emberi test gépekkel való helyettesítését javaslod. Az emberi lényből semmi sem marad meg.*

RAY: *Nem értünk egyet az emberi meghatározásában. De mit javasolsz, hol húzzuk meg a határvonalat? Az emberi test és agy biológiai és nem biológiai beavatkozásokkal történő gyarapítása aligha számít új elképzelésnek. És még mindig nagyon sok az emberi szenvedés.*

BILL: *Nincs kifogásom az emberi szenvedés enyhítésével szemben. De az emberi testet géppel helyettesíteni azért, hogy nőjön a teljesítményünk... Marad a gép. Az autók ugyan gyorsabban közlekednek, mint az ember, de nem tartjuk embernek őket.*

RAY: *Ennek a problémának sok köze van a „gép” szóhoz. A te gépfelfogásod az embernél lényegesen kevésbé megbecsült – kevésbé komplex, kreatív, intelligens, értelmes, finom és alkalmazkodó – valamire vonatkozik. Mivel érvényes is a legtöbb gépre, amivel találkoztam, ha a mostaniakról beszélünk, akkor el is fogadható. Állításom és az eljövendő szingularitás egyik lényeges eleme épp az, hogy alapjaikban változnak meg a gépről és a nem biológiai intelligenciáról alkotott képzetek.*

BILL: *Nos, pontosan ez a problémám. Korlátaink emberi mivoltunk részei. Nem állítjuk, hogy a lehető leggyorsabb entitások vagyunk, hogy a miénk a lehető legnagyobb memóriakapacitás és így tovább. Embernek lenni viszont olyan meghatározhatatlan, spirituális minőség is, amellyel a gépek természetüknél fogva nem rendelkeznek.*

RAY: *Megint arról van szó, hogy hol húzod meg a határvonalat. Egyes emberek máris nem biológiai pótlásokkal helyettesítik testük és agyuk egyes részeit, és ezek a pótlások jobban teljesítik az „emberi” funkciókat.*

BILL: *Csak akkor, ha beteg vagy lebénuult szervet és rendszereket helyettesítenek. Te viszont a teljes emberi mivoltunkat lecserélnéd az adottságaink kibővítéséért, és ez értelemszerűen nem emberi.*

RAY: *Akkor talán az emberi természet az alapvető nézeteltérésünk tárgya. Számomra nem a korlátaink – pedig sok van belőlük –, hanem a korlátokon túllépés képessége az emberi létezés lényege. Nem álltunk meg a föld talajánál, sőt a bolygónál sem. És már a biológiai korlátainkkal sem érjük be.*

BILL: *A technológia hatalmát különösen körültekintően kell használnunk! Egy bizonyos pont után elveszítünk valami nehezen megnevezhető minőséget, ami értelmet ad az életnek.*

RAY: *Szerintem egyetértünk abban, hogy fel kell ismernünk, mi a fontos az emberi természetben. Viszont semmi okunk nincs arra, hogy a korlátainkat ünnepeljük.*

...az emberi agyra

„Minden, amit látunk vagy látszik, csak álom az álomban?”

(Edgar Allan Poe)

„A számítógép-programozó univerzumok teremtője, ahol ő egyedül a törvényhozó. Drámaíró, színpadi rendező, császár, legyen akármennyire hatalmas is, soha nem gyakorolt ekkora abszolút hatalmat a színpad vagy a csatatér elrendezése felett, s nem parancsolt ilyen rendíthetetlenül kötelességtudó színészeknek és csapatoknak.”

(Joseph Weizenbaum)

„Egy szeles napon két szerzetes vitatkozott egy csapkodó zászlóról. „A zászlót és nem a szelet látom mozogni” – mondta az első. „Úgy látom, hogy a szél, és nem a zászló mozog” – mondta a második. Arra járt egy harmadik is, és így szólt: „A szél nem mozog. A zászló nem mozog. Az elmétek mozog.”

(zen példázat)

„Tegyük fel, hogy valaki azt mondja: »képzeljük el a pillangót pont olyannak, amilyen, viszont gyönyörű helyett csúfnak«.”

(Ludwig Wittgenstein)

A 2010-es forgatókönyv. A következő évtized elején megjelenő számítógépek lényegében láthatatlanok lesznek; ruhánkba lesznek varrva, be lesznek ágyazva bútorainkba és a környezetünkbe. Kiaknázzák a gyors kommunikáció és a számítási erőforrások világméretű hálózatát (amivé egyszer a világháló fog átalakulni, mihelyt valamennyi összekapcsolt kommunikáló eszköze webszerverré válik, óriási szuperszámítógépeket és memóriabankokat alakítva ki). Még nagyobb lesz a sávszélesség, az interneten bármikor kommunikálhatunk vezeték nélkül. A kijelzőket a szemüvegekbe és kontaktlencsékbe építik, a képeket közvetlenül a retinánkra vetítik ki. A Védelmi Minisztériumban már használják az ezeket az elveket érvényesítő technológiákat; azzal a céllal, hogy katonák kiképzésére alkalmas virtuálisvalóság-környezeteket építsenek fel.^[582] A hadsereg Kreatív Technológiák Intézete nemrég mutatott be egy lenyűgöző, a felhasználók megnyilvánulásaira pontosan reagáló, virtuális embereket tartalmazó immerzív virtuálisvalóság-rendszert.

Audiokörnyezeteket is hasonló parányi eszközök fognak „kivetíteni.” Már léteznek olyan, ruhába integrált mobiltelefonok, amelyek fülbe „vetítik” a hangot.^[583] És létezik olyan MP3-lejátszó is, amely a koponyánkat rezegteti, hogy csak mi halljuk a zenét.^[584] A hangnak a katonák sisakján keresztül egyenesen a koponyába történő továbbítása terén a hadsereg úttörő munkát végez.

Találkozhatunk rendszerekkel, amelyek a hangot távolról és csak a meghatározott személyekhez juttatják el. A *Különvélemény* című film személyre szabott, beszélő utcai hirdetései ezt a technológiát jelenítették meg. A Hypersonic Sound technológia és az Audio Spotlight rendszerek ultrahangok modulálásával érik el ugyanezt. A levegőbe sugárzott megfelelő frekvenciájú ultrahangnyalábok kölcsönhatásba lépnek, és a tér adott pontjában hallható hangot hoznak létre. Ha többféle nyalábegyüttest sugárzunk falakra vagy más felületekre, hangfalak nélkül is kivitelezhető egy újfajta, személyre szabott térhatású hangzás.^[585]

Ezek a források bármikor nagy felbontású, teljes bemerülést nyújtó, látható és hallható virtuális valóságról gondoskodnak. A valódi világra újabb rétegeket rakó kijelzőkkel valós idejű tanácsokat és magyarázatokat adó bővített valóságunk is lesz. Például a retinális kijelző emlékeztethet arra, hogy „ő dr. John Smith, az ABC Intézet igazgatója, hat hónapja, az XYZ-konferencián láttad utoljára”, vagy „ez az Idő-Élet Épület, a találkozó a tizedik emeleten lesz.”

Lesz – főként feliratozva – valós idejű fordítás idegen nyelvekre, és a napi tevékenységünkbe integrált online információhoz is többféleképpen férhetünk hozzá. A valódi világra rétegzett virtuális segédek nem várnak mindig kérdésekre és utasításokra, hanem, látva, hogy egy-egy információdarab megtalálásával küszködünk, maguktól lépnek elő ötletekkel. (Mintha azon tűnődnénk, hogy „ez a színész... aki a hercegnőt játszotta, vagy a királynő volt... abban a robotos filmben”, és a virtuális segéd a fülünkbe suttozna, vagy a látómezőnkbe vetítené: „Natalie Portman, Amidala királynő

a *Csillagok háborúja* első, második és harmadik részében.”)

A 2030-as forgatókönyv. A nanobot-technológia teljes bemerülést kínál, tökéletesen meggyőző virtuális valóságról fog gondoskodni. A nanobotok az érzékszervi idegsejtjeink közötti összes kapcsolat fizikai közelségébe pozicionálják magukat. Már rendelkezünk az idegsejtekkel mindkét irányban kommunikáló elektronikus eszközökkel, ám magukkal az idegsejtekkel még nincs közvetlen kapcsolat. A Max Planck Intézet kutatói például a közeli idegsejt kisülését észlelő, vagy kisülésre készítő, kisülést megakadályozó „neurontranzisztort” fejlesztenek.^[586] Mindez az idegsejtek és az elektronikai alapú neurontranzisztorok közötti kétirányú kommunikációhoz vezet. Mint ahogy fentebb említettem, kvantumpöttyökön szintén kimutattak az idegsejtek és az elektronika közötti kommunikáció sebészeti beavatkozás nélküli megvalósítására alkalmas tulajdonságokat.^[587]

Ha a tényleges valóságban akarunk élményeket szerezni, a nanobotok egyszerűen ott maradnak, ahol vannak (a hajszálerékben), és nem csinálnak semmit. Ha be akarunk lépni a virtuális valóságba, elfojtják és a virtuális környezethez illő jelekkel helyettesítik a valódi érzékszerveink felől érkező összes inputot.^[588] Elvégre az agy nem kísérletezik közvetlenül a testtel. Mint ahogy a negyedik fejezetben kifejtettem, a test felől jövő – másodpercenkénti több száz megabitnyi – input érintésre, hőmérsékletre, savszintekre, a táplálék útjára és más fizikai eseményekre vonatkozó információt ábrázol, áthalad a Lamina I. gerincvelői terület idegsejtjein, majd átmegy a hátsó ventromediális magon, és az agykéreg két inzuláris régiójába érkezik. Ha hibátlan a kódolás – az agy visszafejtésére tett fáradozásainkból tudni fogjuk, hogyan tegyük azzá –, az agy valódiként éli meg a mesterséges jeleket. Eldönthetjük, hogy izmainkat és lábunkat úgy mozgassuk, mint közönséges esetben tesszük, a nanobotok viszont feltartóztatják az idegsejtek közötti jelzéseket, megakadályozzák a valódi lábaink mozgását – helyette virtuális végtagjaink mozognak –, egyensúlyrendszerünkhöz pedig pontosan hozzáadják a szükséges mozgásokat és a virtuális környezetben használt orientációs koordinátákat.

A világháló felfedezésre váró virtuális környezetek garmadájával fog szolgálni. Egyesekkel valós helyek teremődnek újra, mások viszont fizikai világbeli megfelelők nélküli fura közegek lesznek. Sőt, mivel a fizika törvényei nem vonatkoznak rájuk, alkalmasint olyanokkal is találkozunk majd, amelyek a valóságban elképzelhetetlenek. Fel tudjuk keresni ezeket a virtuális helyeket, valódi és szimulált személyekkel (természetesen nem lesz egyértelmű különbség köztük) egyaránt akármilyen interakciót folytathatunk, az üzleti tárgyalástól kezdve az érzéki találkáig. A „virtuálisvalóság-környezet-tervező” új munkakörleírás és művészi forma lesz.

Válj valaki mássá! Mivel változtatni tudjuk megjelenésünket és sikeresen más személlyé válhatunk, a virtuális valóságban nem korlátozódunk egyetlen személyiségre. Ezekben a háromdimenziós virtuális környezetekben odavetített testünket a fizikai megfelelő (tényleges valóságban történő) módosítása nélkül is könnyedén megváltoztathatjuk. Egyszerre válogathatunk különféle testek között, különféle személyek részére. Szüleink valamilyennek látnak, míg párunk egy másik testünkkel él át élményeket. Társunk viszont akár semmibe is veheti a választásunkat, és jobban kedvelheti, ha másként, nem az általunk kiválasztott testben lát. Különféle személyekhez különféle testi kivetítést választhatunk: Ben Franklint egy kedves nagybácsihoz, bohócot egy idegesítő munkatárshoz. Romantikus párok pedig olyanokat, amilyenek lenni szeretnének, sőt akár eggyé is válhatnak. Könnyen váltogatható döntésekről van szó.

Abban a szerencsében volt részem, hogy a Monterey-ben rendezett 2001-es TED-(technológia,

szórakozás, design)-konferencián egy virtuálisvalóság-bemutatón átélhettem, milyen, ha magamat más személyként vetítem ki. A ruhámon lévő mágneses érzékelők segítségével egy számítógép pontosan követte az összes mozgásomat. Ultragyors animációval elkészítettem egy fiatal hölgy – a mozgásomat valós időben követő Ramona – életnagyságú, szinte fényképhű másolatát. A hangomat jelfeldolgozó technológiával női hanggá alakították. Ramona szájmozgását is vezérelték. A TED közönségének úgy tűnt, mintha maga Ramona tartotta volna a bemutatót.^[589]

Ahhoz, hogy érthető legyen az elképzelés, a közönség egyszerre láthatott engem és Ramonát, miközben mindketten szimultán és egyformán mozogtunk. Zenekar jött fel a színpadra, és én – Ramona –, mintha az eredeti szám lett volna, előadtam a Jefferson Airplane *White Rabbit* című számát. Az akkor tizennégy éves lányom – szintén mágneses érzékelőkkel felszerelve – csatlakozott hozzám, táncmozdulatai egy férfi tartaléktáncos, a virtuális Richard Saul Wurman, a TED-konferencia impresszáriójának mozgásává lettek átalakítva. A bemutató csúcspontjaként a közönség látta, hogy a nem kifejezetten hip-hop mozdulatairól híres Wurman meggyőzően játssza el a lányom tánclépéseit. A Warner Bros. kreatív vezetői is ott ültek, majd kimentek, és elkészítették a *Simone* című mozit. A filmben az Al Pacino által játszott karakter nagyjából ugyanígy változtatja át magát Simone-ná.

A kísérlet nagy jelentőségű és megható volt számomra. A kibertükörbe (egy kijelző, amely mutatta nekem, mit lát a közönség) nézve inkább Ramonának láttam magam, és nem annak a személynek, aki általában visszanéz a tükörből. Nemcsak a szellemi ötletet, hanem a valaki mássá történő átváltozás érzelmi erejét is átéltem.

Az emberek identitása gyakran szorosan összekapcsolódik a testükkel („nagy orrom van”, „sovány vagyok”, „nagydarab vagyok” stb.). Úgy vélem, felszabadító hatású, ha más személlyé változunk át. Mindnyájunkban személyiségek sokasága lakozik. Képesek vagyunk az összeset magunkban hordozni, de mivel nem állnak rendelkezésünkre olyan eszközök, amelyekkel kifejezésre juttathatnánk őket, általában elfojtjuk ezeket a személyiségeket. Jelenleg nagyon korlátozott a hozzáférhető technológia – mint például a divat, a smink, a frizura – ahhoz, hogy különböző kapcsolatoknak, alkalmaknak megfelelően alakítsuk át magunkat. A jövőbeli, teljes bemerülést kínáló virtuálisvalóság-környezetekben viszont jócskán bővíthetjük személyiségpalettánkat.

Amellett, hogy az összes érzéket felölelik, ezek a megosztott környezetek érzelmi rétegekkel is rendelkeznek. A nanobotok képesek lesznek létrehozni az érzelmek, szexuális örömek, érzékszervi élményeink más megnyilvánulásainak és a szellemi reakcióknak a neurológiai megfelelőit. Az agyat megnyitó sebészeti kísérletek kitűnően szemléltették, hogy bizonyos speciális pontok stimulálása érzelmi élményeket indíthat el. (Például, ahogy a *The Age of Spiritual Machines* [*A spirituális gépek kora*] című művemben is beszámoltam róla, egy lány agyában egy meghatározott pontot stimuláltak, és mindent szórakoztatónak talált.)^[590] Egyes érzelmekkel és másodlagos reakciókkal inkább agytevékenység-mintázatok, mint speciális idegsejtek stimulálása jár együtt. Masszívan elosztott nanobotokkal viszont ezek a mintázatok is stimulálhatóak lesznek.

Élménysugárzók. Az „élménysugárzók” az érzékszervi élmények és az érzelmi reakciók neurológiai megfelelőinek teljes áramlását ugyanúgy eljuttatják a webre, ahogy ma webkameráról közvetítjük hálósobánk képeit. Népszerű időtöltés lesz mások érzékszervi-érzelmi élményeibe bekapcsolódni és *A John Malkovich menet* mintájára átélni, milyen is annak a másik személynek lenni. Archivált élmények széles választékából válogathatunk majd; a virtuálisélmény-tervezés szintén új művészi forma lesz.

Tágítsd ki a tudatodat! 2030 körül a nanobotok legfontosabb alkalmazási területe elménk tényleges kitágítása lesz biológiai és nem biológiai intelligencia egyesítésén keresztül. Az első szakasz a százbilliónyi neuron közötti nagyon lassú kapcsolat feljavítása lesz nagy sebességű nanorobot-kommunikáción keresztüli virtuális kapcsolatokkal,^[591] aminek következtében módunkban áll majd, megnövelni mintafelismerő adottságainkat és gondolkodási képességünk egészét, illetve közvetlen érintkezésbe léphetünk erős nem biológiai intelligenciákkal is. A technológia segítségével az agyak vezeték nélkül kommunikálhatnak egymással.

Fontos rámutatni, hogy bőven a XXI. század első felének a vége előtt a nem biológiai anyagok közvetítésével történő gondolkodás válik túlsúlyossá. Mint ahogy a harmadik fejezetben áttekintettem, a biológiai emberi gondolkodás (azagyterületek neuromorf modellezése alapján) agyanként és másodpercenként 10^{16} , az összes emberi agyat tekintve pedig nagyjából 10^{26} műveletre korlátozódik. A számok még a genom biomérnöki finomhangolásával sem változnak észrevehetően. Ezzel szemben a nem biológiai intelligencia feldolgozókapacitása (és a növekedés mértéke is) exponenciálisan nő, a 2040-es évek közepéig jócskán túlszárnyalja majd a biológiai intelligenciát.

Addigra már túllépünk a „nanobotok a biológiai agyban” paradigmán. A nem biológiai intelligencia többmilliárdszor hatalmasabbá válik, és ennek megfelelően túlsúlyba kerül. Az emberi test módosításokat és tetszőleges új formákban való újramegtestesüléseit biztosító 3.0-s változatát fogjuk birtokolni. A század második évtizedének teljes bemerülést biztosító vizuális-auditív virtuális környezetekben testünket képesek leszünk gyorsan megváltoztatni; a 2020-as évek teljes bemerülést kínáló virtuális valóságai összes érzékünket egyesítik, míg a tényleges valóságban a 2040-es években történik meg ugyanez.

Mivel teljes mértékben az ember–gép-civilizáció származéka, a legalábbis részeiben az emberi intelligencia visszafejtésén alapuló nem biológiai intelligenciát még mindig emberinek kell majd tekinteni. Ezt a fontos filozófiai kérdést a következő fejezetben fogom vizsgálni. Az intelligencia eme két világának egyesülése nem csupán a biológiai és nem biológiai gondolkodómédiumok fúziója, hanem – ami sokkal fontosabb – az elménket virtuálisan bármely elképzelt módon kitágítani képes gondolkodásmódé és -szervezése is.

Jelenlegi agyunk viszonylag változatlan szerkezettel bír. Jóllehet a tanulási folyamat természetes részeként az idegsejtek közötti kapcsolatokhoz és az ingerületátvivő anyagok koncentrációjához mintázatok adunk, az emberi agy mai teljes kapacitása erősen korlátozott. Mihelyt gondolkodásunk nem biológiai darabjai a 2030-as évek végére túlsúlyba kerülnek, túl tudunk lépni az agy idegi területeinek alapépítményén. A masszívan elosztott nanobotokon alapuló agyi beültetések jelentős mértékben kitágítják majd a memóriánkat, illetve mérhetetlenül feljavítják az összes érzékszervi, mintafelismerő és kognitív képességünket. Mivel a nanobotok kommunikálnak egymással, idegsejtkapcsolatok bármilyen sorozatát el tudják majd készíteni (a neuronok kisülését elfojtva), létező kapcsolatokat szüntethetnek meg, ugyanúgy teremtenek új biológiai és nem biológiai hibridekből álló hálózatokat, és adhatnak hozzájuk teljes mértékben nem biológiaiakat, ahogy az intelligencia nem biológiai formáival is bensőséges kapcsolatokat alakíthatnak ki.

A nanobotok használata elmebővítőként jelentős előrelépés a mostanában elkezdett sebészi idegbeültetésekhez képest. A nanobotok sebészet nélkül, a vérkeringésen keresztül jutnak a testbe, és ha szükséges, úgy is irányíthatók, hogy távozzanak, azaz a folyamat könnyen visszafordítható lesz. Programozva lesznek, és a program alapján például virtuális valóságot szolgáltatnak, aztán pedig különböző módszerekkel kibővíthetik az elménket. Megváltoztathatják a konfigurációt, átalakíthatják szoftverüket. Talán a legfontosabb, hogy nagymértékben eloszlanak majd, és így az agy több milliárd

pontjára eljutnak, míg a sebészileg beültetett neurális implantátumok csak egyetlen, esetleg néhány helyre tehetőek.

MOLLY 2004: *Nem túl csábító a teljes bemerülést kínáló virtuális valóság. Arra gondolok, hogy az agyamban futkározó összes nanobot olyan, mint a kicsi poloskák.*

RAY: *Ó, nem fogod jobban érezni őket, mint a fejedben lévő idegsejteket vagy a baktériumokat a béltraktusodban.*

MOLLY 2004: *Ami azt illeti, az utóbbiakat tényleg érzem. Viszont már most is lehet teljes bemerülést biztosító élményem a barátaimmal, és tudod, hogy? Ha fizikailag vagyunk együtt.*

SIGMUND FREUD: *Hm, ugyanezt mondogatták a telefonról is fiatal koromban. Azt szokták mondani, hogy „mi szükségünk több száz mérföldre lévőkkal beszélgetni, amikor együtt is lehetünk?”*

RAY: *Pontosan, a telefon a hallás virtuális valósága. Tehát a teljes bemerülést kínáló VV alapvetően egy egész testes telefon. Bárkivel bármikor együtt lehetsz, és sokkal többet tehettek a puszta beszélgetésnél.*

GEORGE 2048: *Az biztos, hogy a szexmunkásoknak áldás volt; ki sem kellett mozdulniuk otthonról. Annyira lehetetlenné vált bármilyen értelmes határvonalat húzni, hogy 2033-ban a hatóságoknak a virtuális prostitúció legalizálásán kívül nem volt más választásuk.*

MOLLY 2004: *Nagyon érdekes, de valójában nem túl vonzó.*

GEORGE 2048: *Rendben, de vedd figyelembe, hogy a kedvenc szórakoztatóipari sztároddal is együtt lehetsz!*

MOLLY 2004: *Képzeletben akkor tehetem meg, amikor csak akarom.*

RAY: *Szép a képzelet, de a valódi – vagy inkább a virtuális – sokkal, nos, sokkal valódibb.*

MOLLY: *Igen, de mi van, ha foglalt a „kedvenc” celebem?*

RAY: *A 2029 körüli virtuális valóságnak egy másik előnye, hogy több millió mesterséges ember közül válogathatsz.*

MOLLY 2104: *Értem én, hogy visszamentél 2004-be, de ettől a terminológiától nagyjából akkor szabadultunk meg, amikor 2052-ben elfogadták a Nem Biológiai Személyek Törvényét. Azt akarom mondani, hogy sokkal valódibbak vagyunk, mint... Khm... Hadd fogalmazzam újra!*

MOLLY 2004: *Igen, talán ezt kéne tenned.*

MOLLY 2104: *Hadd mondjam csak azt, hogy nem kell egyértelmű biológiai szerkezettel rendelkezned ahhoz...*

GEORGE 2048: *...hogy szenvedélyes legyél?*

MOLLY 2104: *Szerintem tudnod kellene.*

TIMOTHY LEARY: *Mi van, ha rossz tripen vagy?*

RAY: *Azt érted ezen, ha valami fonákul üt ki a virtuálisvalóság-élményben?*

TIMOTHY LEARY: *Pontosan.*

RAY: *Nos, otthagyhatsz. Úgy, mint amikor híváskor kinyomod a telefont.*

MOLLY 2004: *Feltéve, ha még ellenőrzésed alatt tartod a szoftvert.*

RAY: *Igen, erre oda kell figyelniük.*

SIGMUND: *Látok itt néhány valódi terápiás lehetőséget.*

RAY: *Igen, a virtuális valóságban az lehetsz, aki csak lenni akarsz.*

SIGMUND: *Tökéletes lehetőség az elfojtott vágyak kifejezésére...*

RAY: *És nemcsak együtt lenni azzal a személlyel, akivel együtt akarsz lenni, hanem azzá a személlyé is válhatsz.*

SIGMUND: *Pontosan. Libidónk tárgyait egyébként is a tudatalattinkban teremtyük meg. Gondolj csak bele, hogy egy párból mindketten nemet válhatnak!*

MOLLY 2004: *Feltételezem, csak terápiás közjátékként?*

SIGMUND: *Természetesen. Csak a gondos felügyeletem mellett javasolnám.*

MOLLY 2004: *Magától értetődően.*

MOLLY 2104: *Hé, George, emlékszel, amikor az Allen Kurzweil-regényben⁽⁵⁹²⁾ egyszerre mindketten nemet váltottunk?*

GEORGE 2048: *Haha, legjobban a XVIII. századi feltalálóként tetszettél, aki erotikus zsebórákat készített!*

MOLLY 2004: *Rendben, most pedig futtassátok le velem még egyszer ezt a virtuális szex dolgot! Pontosan hogyan is működik?*

RAY: *A szimulált virtuális tested használad. Az idegrendszeredben és az idegrendszer körül lévő nanobotok az összes érzéked számára pontosan kódolt jelzéseket generálnak: láthatót, hallhatót, természetesen tapinthatót, sőt szaglószerit is. Az agyad szemszögéből nézve ez valóságos, mivel a jelek ugyanúgy valódiak, mintha tényleges élmények alapján az érzékszerveid hoznák létre őket. A virtuális valóságbeli szimuláció általában a fizika törvényeit követné, igaz, az általad választott környezettől is függene. Ha más személlyel vagy személyekkel mész oda, ezeknek a más intelligenciáknak, legyenek akár biológiai testtel rendelkező emberek vagy egyebek, szintén van testük ebben a virtuális környezetben. Nem kell, hogy a virtuális valóságbeli tested ugyanaz legyen, mint a valódi. A magadnak választott test tulajdonképpen el is térhet attól, amit veled egy időben a partnered választ neked. A virtuális környezetet, testeket és a hozzájuk kapcsolódó idegi alapú jelzéseket generáló számítógépek úgy működnek együtt, hogy a cselekvéseid hassanak a másik virtuális élményére, és fordítva.*

MOLLY 2004: *Magyarán, még akkor is átélném a szexuális élményt, ha valójában senkivel sem lennék együtt?*

RAY: *Nos, valakivel lennél, csak nem a tényleges valóságban, ahol – természetesen – ez a valaki talán nem is létezik. A szexuális gyönyör nem közvetlen érzékszervi élmény, hanem az érzelemhez hasonló. Az agyban keletkezett, a cselekvéseidre és gondolataidra reagáló érzet, ugyanúgy, mint a humor vagy a harag.*

MOLLY 2004: *Mint az általad említett lány, aki, miután a sebész az agyának egy bizonyos pontját stimulálta, szórakoztatónak talált mindent?*

RAY: *Pontosan. Az összes élményünknek, érzésünknek és érzelmiünknek megvannak a neurológiai megfelelői. Egyesek lokalizálhatók, míg mások egy-egy aktivitási mintázat formájában jelentkeznek. A virtuálisvalóság-élmény részeként érzelmeinket bármelyik esetben képesek leszünk formálni és erősíteni.*

MOLLY 2004: *Egész jól működhet. Azt hiszem, a romantikus közjátékaimban fel fogom javítani a mulatságos megnyilvánulásaimat. Pont jól fognak passzolni hozzájuk. Vagy talán az abszurd válaszaimat, valahogy azokat is kedvelem.*

NED LUDD: *Látom, ahogy elszabadul az egész; az emberek lassan virtuális valóságban fogják eltölteni idejük javarészét.*

MOLLY 2004: Ó, a tízéves unokaöcsém már most ott van a videojátékaival.

RAY: De azok egyelőre még nem kínálnak teljes bemerülést.

MOLLY 2004: Ez igaz. Őt ugyan látjuk, de nem vagyok biztos benne, hogy ő is észrevesz minket. Viszont, ha eljutunk odáig, hogy a játékaik teljesen immerzívek lesznek, soha többé nem fogjuk már látni.

GEORGE 2048: Értem a 2004-es soványka virtuális világokkal kapcsolatos kételyeidet, viszont a 2048-as virtuális világainkban nincsenek ilyen problémák. Sokkal, de sokkal lenyűgözőbbek, mint a valódi világ!

MOLLY 2004: Igen, de honnan tudod, ha soha nem tartózkodsz a valódi világban?

GEORGE 2048: Elég sokat hallok róla. Különben is szimulálhatjuk.

MOLLY 2104: Nos, amikor csak akarom, akkor lehet valódi testem, nem nagy ügy. Azt kell mondanom, inkább felszabadító hatású, hogy nem függsz egy adott testtől, pláne nem egy biológiától. Van fogalmad arról, az utóbbi számtalan korlátja és nyűge mennyire behatárolna bennünket?

MOLLY 2004: Igen, azt hiszem, tudom, mire célzol.

...az emberi élettartamra

„Az összes biológiai tudományban az egyik legfigyelemreméltóbb tény az, hogy nincsen magyarázatunk a halál szükségességére. Ha örökmozgót akarnánk építeni, már felfedeztünk annyi természeti törvényt a fizika tanulmányozásával, hogy lássuk, örökmozgót építeni vagy teljes lehetetlenség, vagy a fizikai törvények tévednek. De a biológiában semmi olyat nem fedeztünk még fel, ami a halál elkerülhetetlenségére utalna. Ez számomra azt jelenti, talán nem is olyan elkerülhetetlen, és csak idő kérdése, hogy a biológusok felfedezzék, mivel van a baj, és képesek legyünk gyógyítani ezt a szörnyű, általános kórt vagy kijavítani az emberi test átmenetiségét.”

(Richard Feynman)

„Sohase engedjete, sohase engedjete, soha, soha, soha, soha – semmiben, se nagyban, se kicsiben, se fontosban, se jelentéktelenben – ne engedjete semminek!”

(Winston Churchill)

„Először a halhatatlanságot! Minden más várhat.”

(Corwyn Prater)

„A kényszerű halál a biológiai evolúció sarokköve, de ettől a tényről még nem lesz jó dolog.”

(Michael Anissimov)

„Tételezzük fel, hogy egy kétszáz évvel ezelőtti tudós vagy, aki kitalálta, hogyan lehet jobb higiéniával drasztikusan csökkenteni a gyermekhalandóságot! Erről tartasz előadást, mikor hátul feláll valaki, és így szól: »Egy pillanat! Ha így teszünk, népességrobbanás következik be!« Ha azt válaszolod, hogy »Nem, minden rendben lesz, mert szex közben rajtunk lesz ez az abszurd gumimicsoda«, senki se vesz komolyan.

Pedig pontosan ez történt – a fogamzásgátlást széles körben elfogadták (nagyjából akkoriban, amikor a gyermekhalandóság csökkent)."

(Aubrey de Grey, gerontológus)

„Van egy kötelességünk: hogy meghaljunk.”

(Dick Lamm, Colorado állam korábbi kormányzója)

„Némelyikünk azt gondolja, hogy ez elég nagy kár.”

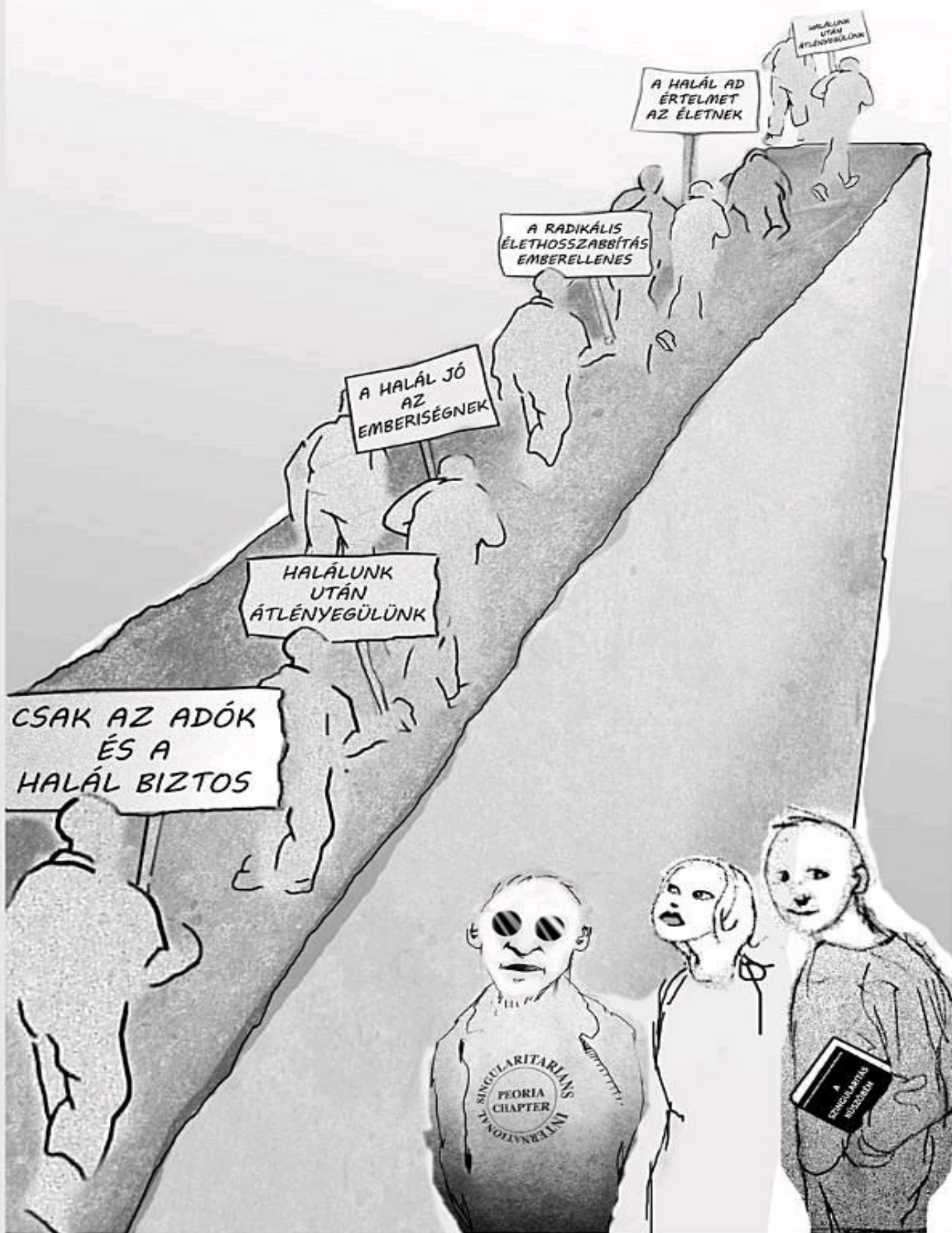
(Bertrand Russell, 1955,

megjegyzést fűzve ahhoz a statisztikához, mely szerint mindennap nagyjából százezer ember hal meg életkorral kapcsolatos okok miatt.)⁽⁵⁹³⁾

„Az emberiséget megteremtő folyamatnak, az evolúciónak csak egyetlenegy célja van: saját másolataik legyártására maximálisan alkalmas géngépek alkotása. Visszatekintve, ez az egyetlen módja annak, hogy olyan komplex szerkezetek, mint az élet, megjelenhessenek egy nem intelligens univerzumban. Halált, fájdalmat és rövid életet okozva, a cél gyakran ütközik az emberi érdekekkel. Az emberiség múltbeli fejlődése egyet jelent az evolúciós kényszerek szétzúzásával.”

(Michael Anissimov)

Ennek a könyvnek a legtöbb olvasója valószínűleg még elég fiatal ahhoz, hogy megélje a szingularitást. Mint ahogy az előző fejezetben áttekintettük, a biotechnológia gyorsuló fejlődése lehetővé teszi a géneknek és a metabolikus folyamatoknak a betegségek és az öregedés kikapcsolását célzó újraprogramozását. E fejlődés részeit képezi a genomika (a gének befolyásolása), a proteomika (a fehérjék szerepének megértése és befolyásolása), a génterápia (a génexpresszió elfojtása olyan technológiákkal, mint például az RNS-interferencia és új gének beillesztése a sejtmagba), az ésszerű gyógyszertervezés (a betegségekben és az öregedésben pontos változásokat megcélzó gyógyszerek megalkotása), a sejtjeink, szöveteink, szerveink megfiatalítására használható (a telomereket bővítő, a DNS-t kijavító) gyógyászati klónozás, valamint más, hasonló fejlesztések.



A biotechnológia meghaladja a biológiát, kijavítja nyilvánvaló fogyatékoságait. A nanotechnológiai forradalommal lehetővé teszi, hogy túllépjünk a biológia súlyos korlátain. Ahogy Terry Grossmannal kifejtettük a *Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever* (Fantasztikus utazás: élj olyan sokáig, hogy örökké élj!) című könyvünkben, hamarosan rendelkezésünkre állnak az ismeretek és az eszközök ahhoz, hogy korlátlanul karban tarthassuk és bővíthessük a mindegyikünk által testnek és agynak hívott „házat”. Sajnos a az én nemzedékemben született emberek nagy többsége nincs tisztában azzal, hogy a megelőző generációkkal ellentétben nem kell szenvednie és meghalnia a „normális” életmenetben – ha elég határozottan cselekszik, és cselekedetei túlmutatnak az alapvetően egészséges életvitel szokásos eszméin (lásd *Források és kapcsolat*).

Történelmileg az emberek a korlátolt biológiai élettartamot kizárólag úgy élhették túl, hogy a következő generációknak átadták az értékeket, hiteket és ismereteket. A létezésünk alapjául szolgáló mintázatok megőrzéséhez rendelkezésünkre álló módszerekben mostanában paradigmaváltáshoz közelítünk. A várható emberi élettartam önmagában is stabilan nő, ráadásul a növekedés fel is fog gyorsulni. Jelenleg az élet és a betegségek alapjait jelentő információs folyamatok visszafejtésének a korai szakaszában járunk. Robert Freitas becslése szerint az orvosilag megakadályozható állapotokat tartalmazó speciális listán szereplő problémák 50%-ának a megsemmisítésével a várható emberi élettartam 150 év,^[594] az egészségügyi problémák 90%-ának megelőzésével pedig 500 év fölé terjeszthető ki. A problémák 99%-át megoldva pedig ezer év fölé. Arra számíthatunk, hogy a biotechnológiai és a nanotechnológiai forradalmak teljes sikerét követően gyakorlatilag megszűnik az egészséggel kapcsolatos összes halálozási ok. A nem biológiai létezés felé haladva egyre gyarapodnak az önmagunk másolatának elkészítésére (a tudásunkat, képességeinket és személyiségünket megalapozó alapmintázatok tárolására) alkalmas eszközök, s mindezek következtében meg tudjuk majd szüntetni a legtöbb ismert halálokot.

Várható élettartam (év)^[595]

Várható élettartam	(év) ⁴⁰
Cro-magnoni kor	18
Ókori Egyiptom	25
1400, Európa	30
1800, Európa és Egyesült Államok	37
1900, Egyesült Államok	48
2002, Egyesült Államok	78

„Az ugyanazon a szinten megmaradó elme nem élhet örökké; néhány ezer év elteltével jobban hasonlítana ismétlődő kazettára, mint egy személyre. A meghatározhatatlanul hosszú élethez magának az elmének is növekednie kell... és amikor naggyá válik, és visszanéz... Milyen közös érzései lehetnek azzal a lélekkel, ami eredetileg volt? A későbbiben minden meglesz, ami eredetileg volt. Viszont mérhetetlenül többé vált.”

(Vernor Vinge)

„A jövő birodalmai az elme birodalmai.”

(Winston Churchill)

Az agyfeltöltésről a negyedik fejezetben számoltam be. A közvetlen agyátvitel forgatókönyve az emberi agy (valószínűleg belülről történő) beszkeneléséből, az összes szembetűnő részlet rögzítéséből és az agy állapotának másfajta – feltehetően sokkal hatékonyabb –, számítógépes formában történő ismételt megvalósításából áll. Kivitelezhető eljárás lesz, és a legvalószínűbb, hogy a 2030-as évek végére megvalósul. Viszont nem egyedül így képzelem a nem biológiai tapasztalóhoz való átmenetet. Inkább úgy történik meg, ahogy az összes többi paradigmaváltás szokott: fokozatosan (de gyorsuló ütemben).

Mint ahogy fentebb rámutattam, a nem biológiai gondolkodásra váltás csúszós emelkedő lesz, de már elindultunk rajta. A testünk továbbra is emberi marad, viszont intelligenciánk alakítható kivetítésévé válik. Másként megfogalmazva, mihelyt magunkba fogadtuk az MNT-gyártást, képesek leszünk tetszés szerint meg- és újraalkotni különféle testeket.

Amellett, hogy megvalósítottuk, egy ilyen alapvető változás vajon lehetővé teszi, hogy örökké éljünk? A válasz attól függ, mit értünk az „élni” és a „meghalni” szavakon. Gondoljunk bele, hogy mit teszünk személyes számítógépes fájljainkkal! Ha régiről új gépre váltunk, nem dobjuk ki az összeset. Inkább átmásoljuk, majd újrainstalláljuk őket az új hardveren. A szoftverünk nem feltétlenül tart ki örök időnkig, viszont élettartama lényegileg független, és le van választva arról a hardverről, amelyen fut.

Jelenleg emberi hardverünk összeomlásakor életünk szoftvere – személyes „elme fájlunk” – is vele együtt pusztul el. Viszont abban az esetben, ha birtokoljuk (idegrendszerünk többi részével, belső rendszerünkkel és az elme fájlokban lévő más szerkezetekkel együtt) az agynak hívott mintázatokban kifejezett több billiárdnyi információbyte tárolására és újratárolására szükséges eszközöket, nem lesz többé így.

Elme fájlunk élettartama ekkor már nem függ egyedi hardverek folyamatos életképességétől (például a biológiai test és agy túlélésétől). A szoftveralapú emberek végül jócskán túllépnek a jelen emberének súlyos korlátjain. Túlélnek avilághálón, ha szükségük lesz rá, vagy akarják, testeket – köztük a virtuális valóság változatos birodalmaiban is működő virtuális, holografikus, nanofoglet-jellegűeket, valamint nanobotrajokat és más nanotechnológiai formákat tartalmazó fizikai testeket is – tervezhetnek maguknak.

A XXI. század közepére az ember rendelkezni fog a gondolkodás korlátok nélküli kitágításának képességével. Ez a halhatatlanság egyik formája, bár fontos megjegyezni, hogy az adatok és az információ nem tartanak örökké: az információ élettartama relevanciájától, hasznosságától és

hozzáférhetőségétől függ. Ha valaha is próbálkoztunk régi, bizonytalan formátumban, elavult adattárolási formában fennmaradt információ kinyerésével (például egy 1970-es miniszámítógép mágnesszalagjának tekercséből) megértjük, mekkora kihívás a szoftver életben tartása. Viszont, ha rendszeren gondoskodunk elmeszoftverünk karbantartásáról, gyakran készítünk másolatokat, az aktuális formátumra és médiumra konvertáljuk, a szoftveralapú emberek elérhetnek egyfajta halhatatlanságot. A század későbbi éveiben legalábbis meghökkenünk majd azon, hogy egy korábbi korban az ember nem készített másolatot legértékesebb, agyát és testét tartalmazó információiról.

A halhatatlanságnak ez a formája ugyanaz az elképzelés, mint a ma ismert fizikai ember örök élete? Egy bizonyos szempontból igen, hiszen jelenlegi énünk sem állandó anyaggyűjtemény. Friss kutatások kimutatták, hogy tartós ideig fennmaradónak gondolt idegsejtjeink hetek leforgása alatt megváltoztatják az őket alkotó alrendszereket, például a sejt tubulusok struktúráját. Csak az anyag- és energiamintázatok tartanak ki, viszont azok is fokozatosan változnak. Az emberi szoftver mintázata ehhez hasonlóan fog megmaradni, fejlődni és lassan átalakulni.

De tényleg én leszek az elmefájlomon alapuló, sok számítási anyagon keresztül vándorló, bármely egyedi médiumot túlélő személy?

Ezzel a felvetéssel a tudatosság és személyiség Platón párbeszédei óta vitatott (és a következő fejezetben vizsgálándó) kérdéseihez térünk vissza. A XXI. század során ezek a kérdések udvarias filozófiai viták helyett életbevágó, gyakorlati, politikai és jogi szembenállások témái lesznek.

Egy kapcsolódó kérdés: kíváncs-e a halál? A halál „szükségyszerűsége” mélyen bevésődött az emberi gondolkodásba. Ha tényleg elkerülhetetlen, ésszerűsítésén, sőt megneemesítésén kívül nem marad más választásunk. A szingularitás technológiája rendelkezésünkre fogja bocsátani a lehetőségeket, amelyekkel az embert valami nála nagyobbá fejleszthetjük, ennél fogva többé már nem kell bizonygatnunk magunknak, hogy az élet főként a halál ellenpontjaként nyer értelmet.

Az információ élettartama

*„– Ezt a rémületes pillanatot – folytatta a Király – soha, de soha nem felejttem el!
– Pedig el fogod felejteni – így a Királynő –, ha föl nem írod a jegyzetfüzetedbe.”
(Lewis Carroll: Alice Tükörországbán – ford. Révbíró Tamás)*

*„Ha a mondás igaz, csak a halálban és az adókban lehetünk biztosak – de a halálban ne legyünk túl biztosak!”
(Joseph Strout, idegtudós)*

*„Nem tudom, uram, de akármilyen is lesz belőlük, biztosra veszem, hogy meg fogja adóztatni.”
(Michael Faraday válasza
a Brit Királyi Kincstár hivatalnokának arra a kérdésére, hogy milyen gyakorlati haszna lehet az elektromágnesesség bebizonyításának)*

*„Csöndben ne lépj az éjszakába át,
Dúlj-fúlj, ha megszakad a napvilág.”
(Dylan Thomas – Nagy László fordítása)*

Életünk, történelmünk, gondolataink és adottságaink információvá alakításának lehetősége felveti

az információ élettartamának kérdését. Apámmal közös tulajdonságom, hogy mindig tiszteltem a tudást; gyerekként is igyekeztem mindenféle információt begyűjteni.

Háttérénél fogva apám azok közé tartozott, akik megőrzik az életüket dokumentáló összes képet és hangot. Ötvennyolc évesen bekövetkezett, idő előtti halálakor megörököltem máig kincsként őrzött archívumait. Megvan a Bécsi Egyetemen 1938-ban írt, Brahms zenei szótárunkhoz való hozzájárulását elemző, egyedi meglátásait tartalmazó doktori disszertációja. A tizenévesen az osztrák dombokon adott híres hangversenyeiről szóló, ügyesen elrendezett újságkivágások is megmaradtak, akárcsak a Hitler uralma alóli menekülést anyagilag támogató amerikai zenei patrónushoz és a patrónus által írt sürgető levelek. (E kivándorlásra közvetlenül a kristályéjszaka előtt került sor; az 1930-as évek végén bekövetkező európai események utóbb már lehetetlenné tették az ilyesmit.) Ezek a darabok emlékek miriadját, többek között fényképeket, lemezre és szalagra felvett zenéket, személyes leveleket, sőt még számlákat is tartalmazó, soktucatnyi öregedő dobozban találhatók.

Az életünkre vonatkozó feljegyzések megőrzése iránti hajlamot szintén tőle örököltem, így az övéivel együtt több száz személyes papírokkal és aktákkal teli ládám van. Apám csak kézi írógéppel és indigóval támogatott termékenységet nem lehet összehasonlítani az enyémmel. Az én gondolataimat összes permutációjukban visszaadó számítógépek és gyors nyomtatók segítik.

Dobozaimban őrizve a digitális média változatos formái is megtalálhatók: lyukkártyák, papírszalagtekercsek, különféle méretű és formátumú digitális mágneses szalagok és lemezek. Gyakran tűnődöm azon, mennyire marad hozzáférhető ez az információ. A sors iróniája, hogy a könnyű hozzáférés fordítottan arányos a létrehozásához használt technológia fejlettségi szintjével. Az idő nyomait ugyan magukon hordó, de remekül olvasható papírdokumentumok a legegyszerűbbek. A bakelitlemezek és az analóg magnók csak egy kicsivel jelentenek nagyobb kihívást. Bár szükség van valamilyen alapberendezésre, nem nehéz egyet találni és használni. A lyukkártyákban valamivel több a kihívás, de lehet még lyukkártya-olvasót találni, és a formátumok egyáltalán nem bonyolultak.

A digitális lemezen és szalagon tárolt információ kinyerése messze a legmegegyőzőbb. Tekintsük át a nehézségeit! Minden egyes médiumhoz pontosan ki kell találnom, milyen lemez- és szalagmeghajtót, vajon 1960 körüli IBM 1620-at vagy 1973 körüli Data General Nova I-et használtak hozzá. Ezt követően, mielőtt összegyűjtöttem a szükséges berendezéseket, a szoftveres szintekkel is foglalkozni kell: megfelelő operációs rendszerrel, lemezmeghajtókkal és alkalmazásokkal. Belefutva a hardver- és szoftverszintek jelentette megannyi egyedi problémába, azt sem tudom, kit hívjak fel segítségért. Egy mai rendszert is épp elég nehéz működtetni, nem beszélve azokról, amelyek ügyfélszolgálatát (ha valaha is létezett olyan) már évtizedekkel ezelőtt szélnek eresztették. Még a Számítógép-történeti Múzeum legtöbb berendezése és kijelzője sem működik már hosszú évek óta.^[596]

Tételezzük fel, hogy sikeresen elhárítottam az összes akadályt! Viszont még így is figyelembe kell vennem azt a tényt, hogy a lemezen lévő tényleges mágneses adatok valószínűleg megrongálódtak, az öreg számítógépek pedig jobbra hibaüzeneteket generálnának.^[597] De az információ tényleg elszállt? A válasz: nem teljesen. Annak ellenére, hogy a mágneses pöttyök talán már nem olvashatóak az eredeti berendezésen, a megfakult részek – az öreg könyvek lapjainak szkenneléskor a képek feljavítására használt módszerekre emlékeztető eljárásokkal – megfelelően érzékeny műszerekkel felerősíthetőek. Ugyan nagyon nehéz megszerezni, de az információ még ott van. Kellő odaadással éstechnikátörténeti kutatással ki is nyerhető. Ha okunk van azt hinni, hogy ezek a lemezek óriási értékű titkokat tartalmaznak, valószínűleg sikeresen visszanyerhetjük a rajtuk tárolt információkat.

A pusztá nosztalgia viszont aligha ösztönöz eléggé bárkit is, hogy nekivágjon az ijesztő feladatnak.

Mivel nagyrészt előre éreztem a problémát, az öreg fájlok zömét kinyomtattam papíron. Viszont, mivel a papírra rögzített másolatarchívumoknak is megvan a maguk problémásora, az összes információ papíron őrzése sem megoldás. Ha a kezemben tartom, még százéves kézírást is jól el tudok olvasni, azonban megtalálni az óhajtott dokumentumot több ezer szegényesen elrendezett mappában idegesítő és időigényes vállalkozás. A jó mappa megtalálása akár egy egész délután eltarthat, a tucatnyi nehéz iratdoboz mozgatása miatti ránduláskockázatokról nem is beszélve. Mikrofilmmel és mikrofilmlemezzel a nehézségek egy része enyhíthető, de a jó dokumentumot még mindig meg kell találni.

Arról álmodoztam, hogy fogom a több százezer lemezt, és beszkennелеm egy masszív személyes adatbázisba, és így lehetőségem nyílik hatékony, kortárs keresési-kinyerési módszerekkel dolgozni rajtuk. Még egy elnevezésem is van erre a vállalkozásra – DAISI (*Document and Image Storage Invention* – Dokumentum- és képtárolási találmány) –; hosszú évekig gyűjtöttem hozzá az ötleteket. A számítógép-úttörő Gordon Bell (a Digital Equipment Corporation korábbi főmérnöke), a DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) és a Long Now Alapítvány az ezt a kihívást kezelő rendszereken dolgoznak.^[598]

A DAISI részt fog venni az összes dokumentumszkennelés és türelmes katalogizálás kifejezetten csüggesztő munkájában. A DAISI-álom valódi kihívása viszont meglepően komoly: hogyan lehetséges az archívumom több évtizedes fennmaradását és hozzáférhetőségét biztosító helyes hardver- és szoftverrétegek kiválasztása?

Saját archiválási szükségletem természetesen csak mikrokozmosza az emberi civilizáció által folyamatosan gyűjtött, exponenciálisan bővülő ismeretbázisnak. Ez az egész faj által megosztott ismeretbázis különböztet meg minket más állatoktól. Más állatok is kommunikálnak, de nem halmozzák fel és fejlesztik tovább az ismeretek növekvő bázisát, hogy aztán továbbadják azt a következő generációnak. Mivel értékes örökségünket – ahogy az orvosiinformatika-szakértő Bryan Bergeron nevezi – „eltűnő tintával” írjuk, civilizációnk hagyatéka, úgy tűnik, nagy veszélyben van.^[599] Ismeretbázisaink növekedésével a veszély is exponenciálisan növekedőnek látszik. Az információtároláshoz használt hardver- és szoftverszintek új szabványaihoz való alkalmazkodás gyorsuló tempója csak tovább súlyosbítja a problémát.

Az agyban tárolt információnak van egy másik értékes raktára is. Memóriánk és képességeink ugyan mulékonynak tűnhetnek, de az ingerületátvivőanyag-koncentrációk, idegsejtek közötti kapcsolatok és más releváns idegrendszeri részletek óriási mintázataiba kódolva tárolják az információt. Ez az információ a legértékesebb, és ez az egyik oka annak, hogy annyira tragikus a halál. Mint ahogy már tárgyaltuk, az agyunkban eldugott több ezer billió információbyte-hoz végül ugyanúgy hozzá tudunk majd férni, képesek leszünk folyamatosan archiválni, mint ahogy meg is fogjuk érteni őket.

Elmének más médiumra másolása számos – a következő fejezetben tárgyalásra kerülő – filozófiai kérdést vet fel, például hogy „tényleg én vagyok, vagy valaki más, akinek éppen sikerült az összes gondolatom és tudásom birtokába jutnia?” Tekintet nélkül arra, hogy hogyan oldjuk meg ezeket a kérdéseket, az információ és agyi információfeldolgozás tárolása magában hordozza „örök életünk” (vagy legalábbis hozzánk nagyon hasonlóan cselekvő entitások örök életének) lehetőségét. De tényleg ez a következmény?

Szellemi szoftverünk korszakokon keresztül a túlélés miatt kérlelhetetlenül össze volt kapcsolva a biológiai hardverrel. Azzal a képességgel, hogy információfeldolgozásunk összes részletét tárolni tudjuk, és újraformálhatjuk, tényleg szétválna egymástól halandóságunk két aspektusa. Viszont,

mint láttuk, a szoftver nem feltétlenül marad fenn örök időkre, és még annak is félelmetes akadályai vannak, hogy nagyon sokáig megmaradjon.

Jelentsen bár az információ akármit – egy személy érzelmi archívumát, az ember–gép-civilizáció felhalmozott ismeretbázisát vagy az agyunkban tárolt elmefájlokat –, mégis: mit várhatunk a szoftverek végső élettartamával kapcsolatban? Csupán ennyi a válasz: az információ csak addig marad meg, amíg valaki törődik vele. DAISI-projektemből levont következtetésem, hogy több évtizednyi fontolgatást követően sincs még jelenleg, és nem is valószínű, hogy lesz olyan hardver- és szoftverszabványkészlet, amely alapján bármilyen szinten okunk lenne bízni a tárolt információ több évtizeddel későbbi (ésszerűtlen fáradozás nélküli) hozzáférhetőségében.^[600] Archívumom (és bármely más információbázis) fennmaradásának egyetlen módja, ha folyamatosan javítják, illetve a legutóbbi hardver- és szoftverszabványokhoz igazítják. Ha egy archívumról nem veszünk tudomást, végül ugyanúgy hozzáférhetetlen lesz, mint a régi 8 colos PDP–8 floppylemezeim.

Az információ „életben maradásához” változatlanul állandó karbantartásra és támogatásra lesz szükség. Legyen szó adatról vagy tudásról, az információ csak akkor marad meg, ha azt akarjuk, hogy megmaradjon. Bővítésekkel is csak addig élünk, amíg törődünk magunkkal. A betegségek és az öregedés szabályozására vonatkozó ismereteink már vannak annyira fejlettek, hogy hosszú távú egészségünket leginkább az élettartamunkhoz való hozzáállás befolyásolja.

Civilizációnk ismerettárháza nem pusztán önmagától marad fenn. Az elődeinktől ránk maradt kulturális és technológiai örökséget folyamatosan újra fel kell fedeznünk, értelmeznünk és formálnunk. Ha senki sem törődik vele, az összes információ elszáll. Jelenlegi bedrótozott gondolataink szoftverre fordítása nem feltétlenül tesz majd minket halhatatlanná. Átvitt értelemben egyszerűen csak a saját kezünkbe adja azokat az eszközöket, amelyekkel meg tudjuk határozni, hogy meddig akarunk élni és gondolkodni.

MOLLY 2004: *Tehát azt mondod, hogy csak egy fájl vagyok?*

MOLLY 2104: *Igen, azonban nem statikus, hanem dinamikus fájl. De mit értesz azon, hogy „csak”? Mi lehet fontosabb?*

MOLLY 2004: *Hát, mindig kidobom a fájljaimat, még a dinamikusakat is.*

MOLLY 2104: *Nem lett minden fájl egyenlőnek teremtve.*

MOLLY 2004: *Feltételezem, hogy ez igaz. Kétségbe voltam esve, amikor elvesztettem a doktori disszertációm egyetlen példányát. Hat hónap munkája veszett oda, és kezdettem előlről az egészet.*

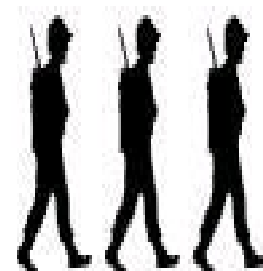
MOLLY 2104: *Á, igen, szörnyű volt! Jól emlékszem rá, pedig több mint egy évszázada történt. Azért volt kétségbeejtő, mert énem részét jelentette. Gondolataimat és kreativitásomat abba az információfájlba fektettem be. Úgyhogy gondold csak bele, mennyire értékesek a te – az én – felhalmozott gondolataid, élményeid, adottságaid és történeted!*

...a hadviselésre: a távirányítású, robotikus, robusztus, miniatürizált, virtuálisvalóság-környezettel segített eszközök paradigmája

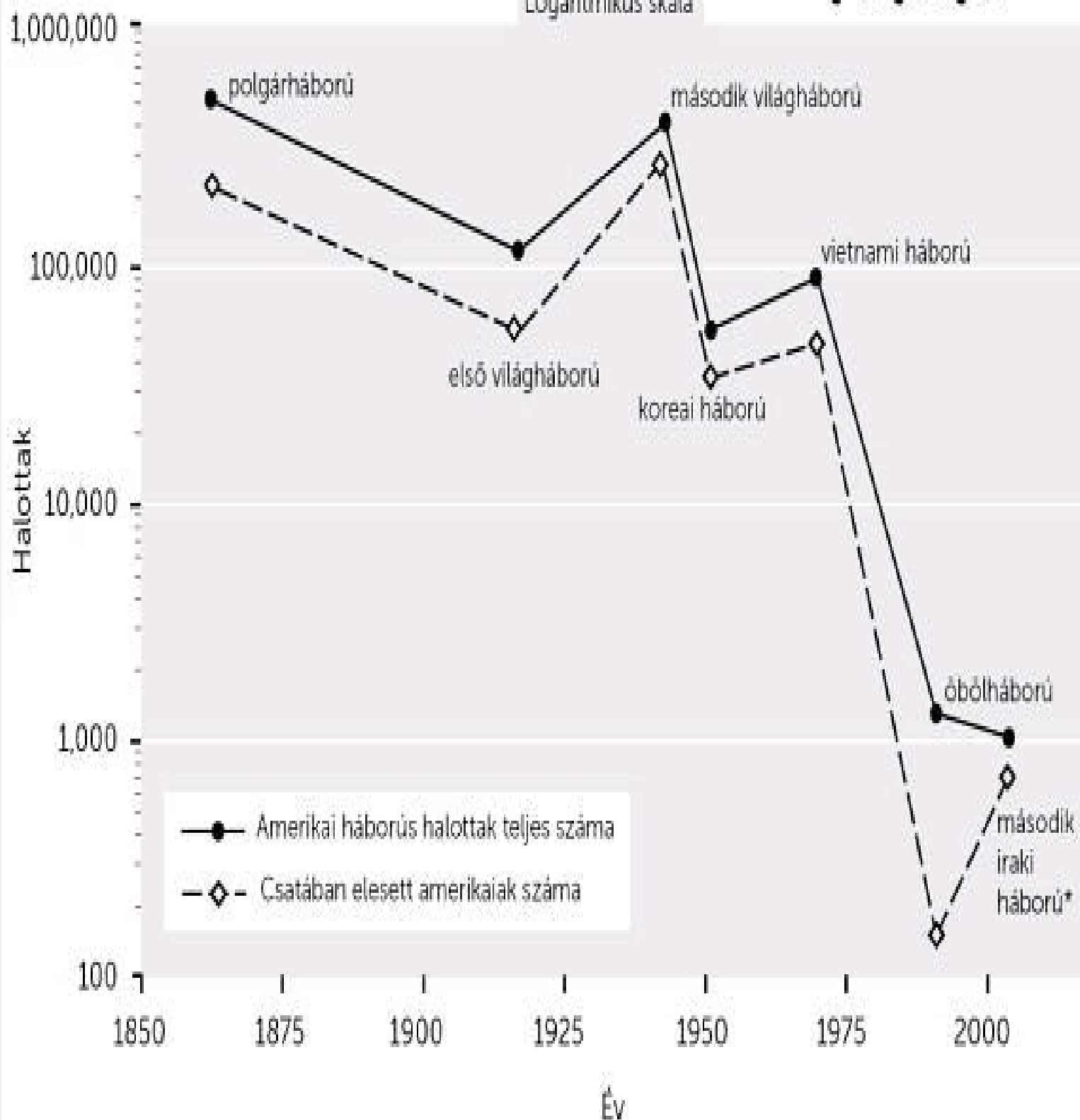
Azzal, hogy a fegyverek intelligensebbek lettek, kibontakozott a kevesebb áldozattal járó katonai küldetések felé mutató trend. Noha ez a részletesebb, valósághűbb tévéhíradókat figyelve talán másként tűnik. A második világháború és a koreai háború néhány nap leforgása alatt több tízezer emberéletet követelő csatáiról csak alkalmi, szemcsés híradófelvételek készültek. Manapság szinte az

összes ütközetet az első sorból nézhetjük. Minden háború összetett folyamat, de az áldozatok számát nézve egyértelmű az általános elmozdulás a precíziós, intelligens hadviselés felé. Ez a trend hasonló az orvostudományban kezdődőhöz – a betegségek elleni intelligens fegyverek sokkal kevesebb mellékhatással hajtják végre különleges küldetéseiket. A kortárs médiatudósításokból ugyan nem úgy tűnik, de a trend a járulékos veszteségek esetében is hasonló (emlékezzünk vissza a második világháború közel ötvenmillió civil áldozatára!).

Az USA háborús halottai



Logaritmikus skála



*2004. szeptember 16-áig

Az Egyesült Államok hadseregének tudományos kutatási prioritásokat javasoló öttagú Army Science Advisory Group (ASAG – a Hadsereg Tudományos Tanácsadó Csoportja) egyik tagja vagyok. Eligazításaink, tanácskozásaink és ajánlásaink ugyan bizalmasak, de a hadsereg és az Egyesült Államok minden más haderőneme által követett néhány általános technológiai irányt közzétehetem.

Dr. John A. Parmentola, az amerikai hadsereg kutatás- és laboratóriumvezetési igazgatója és kapcsolattartója az ASAG-vel, a Védelmi Minisztérium „átalakulási” folyamatát „igen érzékeny, hálózatközpontú, gyors döntésre alkalmas, a ranglétra minden szintjén kiváló, bármely csatatéren megsemmisítő tömeghatásra képes” elmozdulásként írja le.^[601] A fejlesztési fázisban lévő és az ütemterv szerint a század második évtizedében bevezetendő Jövő Harci Rendszert (FCS-t, *Future Combat Systemet*) „kisebbként, könnyebbként, gyorsabbnak, halálosabbnak és okosabbnak” jellemzi.

Drámai változásokat terveznek a jövőbeli háborús hadrend és technológia terén. A részletek ugyan valószínűleg változnak, de a hadsereg jelenleg nagyjából 2500 katonából álló harccsapatdandárokat (BCT-eket, *Brigade Combat Teameket*), ember nélküli robotikus rendszereket és FCS-felszereléseket képzel el. Egy egyszerű BCT mintegy 3300 platformból állna, minden egyes platform intelligens számítási képességgel rendelkezne. A BCT-nek közös, megfelelően értelmezett műveleti képe (COP-je, *common operating picture-je*) lenne a csataterről, és valamennyi katona változatos eszközökön – köztük retinális kijelzőkön és a „fejen viselt kijelzők” más formáin –, a jövőben pedig közvetlen neurális kapcsolaton keresztül jutna hozzá az információhoz.

A hadsereg célja egy BCT 96, egy teljes hadosztály 120 órán belüli hadrendbe állítása. A katonák jelenlegi 45 kilogrammnyi felszerelése új anyagokkal és eszközökkel kezdetben 18-ra csökken, miközben a hatékonyság drámai módon javul. A felszerelés egy részét „robotöszvérekre” rakják.

A kevlár új formáját felhasználva új egyenruhaanyagot fejlesztenek, polietilén-glikolban megkötött szilikátos (kovasavas) nanorészecskékkel. Hétköznapi használatban az anyag rugalmas, nyomásra viszont azonnal gyakorlatilag áthatolhatatlan, késsel szemben is ellenálló masszát formál. A hadsereg Katonai Nanotechnológiai Intézete az MIT-n a harcosok fizikai erejét jelentősen növelő, *exoskeletonnak* (mesterséges külső váznak) nevezett nanotechnológia-alapú anyagot fejleszt a nehéz felszerelés mozgatásához.^[602]

Az Abrams tank hadi használatának húszéves története alatt mindössze három áldozattal, azaz figyelemre méltó túlélési statisztikával rendelkezik, ami a fejlett páncélanyagok és a közelébe kerülő fegyverek, például rakéták elleni intelligens tervezés eredménye. Mindazonáltal a tank több mint hetven tonna, és ezt a számot jelentősen csökkenteni kell ahhoz, hogy az FCS kisebb rendszerekre kitalált céljainak megfeleljen.

Az új, könnyű, de ultraerős nanoanyagok (mint a műanyagokkal kombinált, az acélnál ötvenszer erősebb nanocsövek) a rakétatámadások elhárításához használt növekvő számítógépes intelligenciával együtt drasztikusan csökkentik a szárazföldi harci rendszerek súlyát.

Az ember nélküli légi járművek (UAV-k, *Unmanned Aerial Vehicle-ek*), avagy drónok használata felé mutató, a legutóbbi iraki és afganisztáni hadjáratban bevetett felfegyverzett Predatorral kezdődött trend fel fog gyorsulni. A katonai kutatások közé tartozik a madárméretű, pontos, felderítési és harci küldetésre egyaránt alkalmas mikrodrónok fejlesztése is. A valódi poszméh bal és jobb oldali látórendszerének bonyolult interakcióján alapuló navigáló képesség nemrég kivitelezett visszafejtését alkalmazzák majd ezekre az apró repülő szerkezetekre.

Az FCS központjában önszerveződő, minden egyes katonától és a felszerelés összes darabjától

információt gyűjtő, és fordítva, a pontos információmegjelenítőket és fájlokat valamennyi részt vevő személyhez és géphez visszajuttató, erősen elosztott kommunikációs hálózat áll majd. Nem lesznek ellenséges támadással szemben sebezhető, központosított kommunikációs központok. A kommunikációs rendszer integritásának fenntartása és az információ ellenséges erők általi feltörésének és meghamisításának elhárítása nyilvánvalóan a legfontosabb prioritások egyike lesz. Ugyanez az információbiztonsági technológia – mind elektronikai eszközökkel, mind szoftveres kórokozókat használó kiberhadviseléssel – kerül alkalmazásra az ellenség kommunikációjának megsemmisítése, összezavarása, megszakítása és a sorai közé szivárgás során is.

Az FCS nem egyszeri program, hanem a robusztus, önszervező, elosztott és biztonságos kommunikációval támogatott, távirányítású, önálló döntésképeségű, miniaturizált, robotikus katonai rendszerek kifejlesztését célzó erőfeszítések mintapéldája.

Az Egyesült Államok Összhaderőnemi Parancsnokságának (a fegyveres szolgálatot megváltoztató ötletek kidolgoztatásáért és megvalósíttatásáért felelős) Alpha projektje a 2025-ös haderőt „a küldetés határain belül... bizonyosszintig növelhető, ellenőrzött vagy teljes autonómiával rendelkező” taktikai autonóm harcosokat (TAC-*ket*, *tactical autonomous combatant*okat) is magába foglaló, „nagyértékben robotikus” erőnek képzei el.^[603] A TAC-k széles mérettartományban beszerezhetők lesznek a nano- és mikrobotoktól a nagy UAV-kon és más járműveken át a bonyolult terepeken mozogni képes, egészében automatizált rendszerekig. Egy, a NASA-nál fejlesztésben lévő innovatív terv kígyó formájában képzei el katonai alkalmazásokat.^[604]

A 2020-as évek önszerveződő apró robotrajainak koncepciójához kapcsolódó programok egyike a Haditengerészeti Kutatóiroda Autonóm Intelligens Hálózat és Rendszerek (AINS, *Autonomous Intelligent Network and Systems*) ember nélküli, autonóm vízi, szárazföldi és légi robotok drónseregét felvázoló programja. A projektvezető Allen Moshfegh által „bevehetetlen égi internetnek”^[605] nevezett kezdeményezésben a rajokat humán parancsnokok irányítják decentralizált utasítási és vezérlési rendszerben.

A rajintelligencia tervezésével átfogó kutatások foglalkoznak.^[606] A rajintelligencia azt írja le, hogyan alakulnak ki komplex viselkedési formák viszonylag egyszerű szabályokat követő nagyszámú egyedi ágensből.^[607] Rovarrajok sokszor bonyolult problémákra is képesek intelligens megoldásokat kidolgozni, például azon tény ellenére is meg tudják tervezni egy telep felépítését, hogy a raj egyetlen tagja sem rendelkezik a tervezéshez megkövetelt adottságokkal.

A DARPA 2003-ban jelentette be, hogy egy 120 (a robotika-úttörő Rodney Brooks alapította I-Robot által épített) katonai robotból álló zászlóaljzat látnak el rajintelligencia-szoftverrel; a cél rovarok szervezett viselkedésének utánzása.^[608] Ahogy a robotikus rendszerek mind kisebbek és gyakoribbak lesznek, az önszerveződő rajintelligencia alapelvei egyre fontosabb szerephez jutnak.

A hadseregen belül azt is elismerik, hogy csökkenteni kell a fejlesztésekre szánt időt. Történelmi távlatban nézve a katonai projektek általában több mint egy évtized alatt jutnak el a kutatási fázistól a bevetésig. Mivel sok fegyverrendszer már a csatamezőre kerülve elavult, a fejlesztési időnek lépést kell tartania a technológiai paradigmaváltás ütemének tízévenkénti feleződésével. Az egyik lehetséges megoldás az új fegyverek szimulációkban történő fejlesztése és tesztelése. Ez a hagyományos eljárásoknál – ahol a prototípusgyártás vagy a tényleges használat során a fegyver gyakran megsemmisül – gyorsabb tervezést, kivitelezést és tesztelést tesz lehetővé a fegyverrendszerek esetében.

Egy másik kulcstrend a kezelőszemélyzetnek a harc helyszínétől való eltávolítása, ami a katonák túlélési rátáját javítja lényegesen. Ez úgy valósítható meg, hogy megengedjük a katonáknak a

rendszerek távoli vezetését, irányítását. Ha kivesszük a vezetőt, a jármű kockázatosabb küldetésekből is részt vehet, és sokkal manőverezhetőbbé tervezhető. Ha már nem kell eleget tenniük az emberi életet óvó átfogó elvárásoknak, az eszközök akár pirinyók is lehetnek. A tábornokok még messzebbre húzódhatnak vissza. Tommy Franks katari bunkeréből irányította az afganisztáni háborút.

Intelligens por. A DARPA még a madaraknál és a poszméheknél is parányibb „intelligens por” nevű készülékeket, a gombostűfejnél nem sokkal nagyobb komplex érzékelőrendszereket fejleszt. Ha elkészülnek velük, a szerkezetek millióiból álló rajok mélyen az ellenséges területre dobhatók, és végső soron nagyon részletes felderítést végezve támadó katonai küldetéseket (például nanofegyverek leszerelését) támogathatnak. Az intelligenspor-rendszerek áramellátását nanotervezett üzemanyagcellák, valamint a saját mozgásukból keletkező energia, a szél és a hőáramlatok átalakítása biztosítja.

Meg akarjuk találni az ellenség egy kulcsfontosságú személyét? Elrejtett fegyvereket kell lokalizálni? Lényegében folyamatosan nagyszámú, láthatatlan kém figyelheti az ellenséges terület minden négyzetcentiméterét. Minden személyt és fegyvert azonosíthat (hő- és elektromágneses képalkotó módszerekkel, esetleg DNS-tesztel vagy másként), sőt ellenséges célpontok megsemmisítését előirányzó küldetéseket is elvégezhet.

Nanofegyverek. Az intelligens poron túli következő lépést a nagyobb méretű fegyvereket elavulttá tevő nanotechnológia-alapú fegyverek jelentik. Az ennyire elosztott haderőt az ellenség csak a saját nanotechnológiájával képes ellensúlyozni. Ráadásul ha a nanoszerkezeteket az önreprodukció képességével egészítjük ki, sokkal többet meg tudnak tenni – igaz, egyben a nyolcadik fejezetben tárgyalásra kerülő súlyos veszélyforrásokat is jelenthetnek.

A nanotechnológiát katonai feladatok széles skálájára alkalmazták már. Közéjük tartoznak a páncél javítását célzó nanotechbevonatok, a vegyi és biológiai ágenseket detektáló és azonosító chiplaboratóriumok, a területekfertőtlenítésére szánt nanoméretű katalizátorok, az önmagukat különböző helyzetek függvényében újraszerkesztő intelligens anyagok, a sebesülések elfertőződését csökkentő, egyenruhába integrált csíraölő nanorészecskék, a rendkívül erős anyagok létrehozására alkalmas, műanyaggal egyesített nanocsövek és az öngyógyító anyagok. Az Illinois Egyetemen például folyékony monomer mikrogömböket és műanyag mátrixkatalizátort tartalmazó öngyógyító műanyagot fejlesztettek. Ha valami elreped, a mikrogömbök széttörnek, és automatikusan megjavítják a repedést.^[609]

Intelligens fegyverek. A célpont megtalálásának reményében kilőtt buta lövedékektől mára eljutottunk a maguktól több ezer taktikai döntést hozó intelligens robotrepülőkhöz. A golyók azonban alapvetően kicsi, buta lövedékek maradtak; intelligenssé tenni őket egy másik katonai cél.

A katonai fegyverek méretcsökkenése és növekedő száma mellett nem várható el és nem is kivitelezhető, hogy minden egyes eszközt emberi ellenőrzés alatt tartsunk. Tehát az autonóm kontroll szintjének növelése szintén fontos cél. Mihelyt a gépi intelligencia utoléri a biológiai humán intelligenciát, sokkal több rendszer válik teljesen autonómmá.

VV. Virtuálisvalóság-környezeteket már használnak távolról irányított rendszerek, például az Egyesült Államok légierijéhez tartozó Predator UAV vezérlésére.^[610] Sőt, ha egy katona a fegyverrendszer (például egy Abrams tank) belsejében tartózkodik, nem várjuk el tőle, hogy kinézzen az ablakon, hogy lássa, mi történik. A virtuálisvalóság-környezeteknek biztosítaniuk kell, hogy

érzékeljük a valódi környezetet, és tényleges kontrollunk legyen fölötte. A rajfegyverekkel megbízott humán parancsnokoknak is szükségük lesz specializált virtuálisvalóság-környezetekre, hogy elképzelésük legyen az ezen elosztott rendszerek által összegyűjtött komplex információkról.

A 2030-as évek végére, a 2040-es évek elejére az emberi test 3.0-s változatához és a nem biológiai intelligencia túlsúlyba kerüléséhez közeledve a kiberhadviselés központi kérdéssé válik. Ha minden információ, akkor a saját információ ellenőrzésének képessége és az ellenség kommunikációjának, parancsainak, valamint kontrolljának megbontása lesz a katonai siker elsődleges meghatározója.

...a tanulásra

„A tudomány rendszerezett tudás. A bölcsesség rendszerezett élet.”

Immanuel Kant (1724–1804)

A gazdagabb közösségeket is beleszámítva a világ legtöbb részén az oktatás nem sokat változott a XIV. századi Európa kolostoriskola-modellje óta. Az iskolák változatlanul épületek és tanárok szűkös forrásain alapuló, erősen központosított intézmények. Az oktatás minősége rendkívül változó, a helyi közösség gazdagságától függ (a vagyonadóból történő támogatásának amerikai hagyománya egyértelműen súlyosbítja az egyenlőtlenségeket), így járulva hozzá a tudás megszerzésének lehetőségében mutatkozó különbségek fenntartásához.

Az összes többi intézményhez hasonlóan az oktatásban is a decentralizált rendszer felé haladunk. A jövőben mindenki gyorsan hozzá fog férni a legmagasabb szintű ismeretekhez és tanításhoz. Jelenleg az átalakulás korai szakaszánál tartunk, de máris megjelentek és elérhetők a világhálón tárolt óriási ismeretanyagok, a hasznos keresőmotorok, a jó minőségű, nyílt webes tanszoftverek és az egyre hatékonyabb, számítógéppel támogatott tanulás. Mindezek széles körű és olcsó hozzáférést biztosítanak az oktatáshoz.

A legtöbb nagy egyetem bőséges, sok esetben ingyenes online tanfolyamokat biztosít. E törekvés élenjárója az MIT nyílttanfolyam-szoftver (OCW, *OpenCourseWare*) kezdeményezése. Az MIT az általa kínált tanfolyamok felét, 900-at kínálja ingyen a weben.^[611] Brigitte Bouissou például ezt írja: „franciaországi matematikatanárként meg szeretném köszönni az MIT-nek... a saját óráim előkészítésében sokat segítő, világos előadásokat.” Sajid Latif pakisztáni pedagógus saját tanmenetébe integrálta az MIT OCW tanfolyamát. Oktatásuk fontos részeként pakisztáni diákjai rendszeresen jelen vannak a virtuális MIT-órákon.^[612] Az MIT szándéka, hogy 2007-ig mindenki hozzáférjen online és nyílt forráskódú (nem kereskedelmi célra költségmentes) tanfolyamaihoz.

Az Egyesült Államok hadserege az összes nem fizikai kiképzésnél alkalmaz webalapú oktatási eszközöket. A hozzáférhető, olcsó és egyre jobb minőségű, weben beszerezhető tanfolyamszoftverek is gyorsítják az otthoni tanulás irányába mutató trendet.

Mint ahogy a második fejezetben tárgyaltuk, a magas szintű, internetalapú audiovizuális kommunikáció infrastrukturális költségei gyorsan, nagyjából évi 50 %-os mértékben csökkennek. Az évtized végére kivitelezhető lesz, hogy a világ fejletlenebb régiói az óvodától a doktori tanulmányokig az összes szinten nagyon olcsón magas szintű oktatáshoz férjenek hozzá. Az oktatáshoz való hozzáférést ne korlátozza többé a szerencse – arra, hogy rendelkezésre áll-e minden egyes városban képzett tanár, vagy sem.

A számítógéppel támogatott tanítás (CAI; *computer-assisted instruction*) egyre intelligensebbé

válásával jelentősen bővül az a lehetőség, hogy a tanulói élmény minden egyes diák személyére szabható legyen. Az oktatói szoftverek új generációja modellezni tudja az összes diák erős és gyenge pontjait, majd stratégiát dolgoz ki, hogy az adott diák problématerületére összpontosítson. Az általam alapított Kurzweil Educational Systems vállalat több tízezer iskola olvasási rendellenességekkel küszködő diákja számára kínál a közönséges nyomtatott anyagokhoz hozzáférést biztosító, az olvasási készségüket javító szoftvereket.^[613]

A jelenlegi sávszélesség korlátai és a hatékony háromdimenziós kijelzők hiánya miatt a szokásos webes hozzáféréssel elérhető virtuális környezetek még nem pályáznak az „ott lenni” élményre, de ez meg fog változni. A század második évtizedének elején az audiovizuális virtuálisvalóság-környezetek teljes bemerülést kínáló, magas felbontásúak és meggyőzőek lesznek. A legtöbb egyetem követi az MIT-t; a diákok egyre gyakrabban fognak virtuális órákra járni. A virtuális környezetek magas szintű virtuális laboratóriumokat bocsátanak rendelkezésükre, amelyekben kémiával, atomfizikával és sok más tudományterülettel foglalkozhatnak. A diákok interakcióba tudnak lépni a virtuális Thomas Jeffersonnal vagy Thomas Edisonval, sőt virtuális Thomas Jeffersonokká válhatnak. Az órák minden szinten, sok nyelven elérhetőek lesznek. A magas szintű, nagy felbontású virtuális osztálytermekbe való belépéshez szükséges eszközök akárhol beszerezhetőek, és még a harmadik világ országaiban is megfizethetőek lesznek. Totyogó gyerektől a felnőttekig bármilyen korú diák bármikor és bárhol a világ legjobb oktatásában részesülhet.

Az oktatás természete a nem biológiai intelligenciával való egyesülésünkkel ismét megváltozik. Lehetőségünk lesz tudásunkat és képességeinket legalább intelligenciánk nem biológiai részeibe letölteni. Gépeink manapság rutinszerűen végzik ezt. Ha azt akarjuk, hogy a laptop naprakész beszéd- és betűfelismerő, fordító-, internetkereső készülékkel rendelkezzen, a számítógépnek mást sem kell tennie, csak gyorsan letöltenie a helyes mintázatokat (szoftvert). Biológiai agyunkban még nincs hasonló kommunikációs kapu a tanulást képviselő idegsejtek közötti kapcsolatok és az ingerületátvivő anyagok mintázatainak letöltésére. Ez egyike a mostani gondolkodáshoz használt biológiai paradigma számos korlátjának. Korlát, amelyet a szingularitásban legyőzünk.

...a munkára

„Mert ha minden szerszám parancsra, vagy a maga jószántából el tudná végezni munkáját... ha így a vetélőfa is magától szőne s a lantverő pálcika is magától játszana: nem volna akkor szükségük se az építőmestereknek mesterlegényekre, se az uraknak szolgákra.”

(Arisztotelész – ford. Szabó Miklós)

„Az írás feltalálása előtt mindenbe azonnal betekintést nyerhettünk (legalábbis az érintett személyek kis csoportjának tudásába). Kezdetben minden új. A jelenkorban szinte az összes művészi tevékenységet annak tudatában végezzük, hogy mit tettek korábban és még korábban. A korai poszthumán korban a dolgok ismét újak lesznek, mert Homérosz, Da Vinci vagy Shakespeare semmi olyat nem alkotott még meg, amihez az emberénél magasabb szintű képességek kellenek.”

(Vernor Vinge)^[614]

„[Tudatom] egy része az interneten él, és úgy tűnik, mindig ott van... Egy diák kinyithat

egy tankönyvet. A televízió hang nélkül van bekapcsolva... Fejhallgatón hallgatnak zenét... van egy házfeladat-ablak, e-maíllel és azonnali üzenetküldővel... Egy több feladatot párhuzamosan végrehajtó diák jobban szereti az online világot, mint a szemtől szembenit. »A valódi élet – mondja – csupán eggyel több ablak.«”

*(Christine Boese
Sherry Turkle-nak,
az MIT-professzorának észrevételeiről beszámolva)^[615]*

1651-ben Thomas Hobbes az „ember életét” „magányosnak, szegénynek, csúnyának, állatiasnak és rövidnek” jellemezte.^[616] Tisztességes értékelés volt ez a kor életéről, viszont a technológiai haladással, legalábbis a fejlett világban, jócskán túlléptünk ezen a durva állapoton. A születéskor várható élettartam még a fejlődő országokban is csak kissé marad el a fejlettekéétől. Egy technológiai váltás általában nem túl jól működő, megfizethetetlen termékekkel kezdődik, amelyeketkicsit jobban működő, drága változatok követnek, aztán jönnek a meglehetősen jó, olcsó termékek. A technológia végül nagyon hatékonyvá válik, mindenhol megjelenik és majdnem ingyenessé lesz. A rádió és a televízió, akárcsak a mobiltelefon, ezt a mintázatot követte. A jelenlegi webhozzáférés az „olcsó és meglehetősen jól működik” fázisban van.

Ma egy évtized a korai és a kései befogadás közti különbség, viszont a paradigmaváltás ütemének évtizedenkénti megduplázódásával a különbség a második évtized közepén öt, a 2020-as évek közepén pedig csak pár év lesz. A GNR-technológiák óriási jóléletteremtő potenciáljából kiindulva a létminimum alatti osztály a következő két-három évtizedben eltűnik (lásd a 2004-es Világbank-jelentés ismertetését a második és a kilencedik fejezetben). A változások felgyorsuló üteme miatt a fejlődés azonban valószínűleg egyre erőteljesebb reakciókat fog kiváltani a fundamentalistákból és a ludditákból.

Az MNT-alapú gyártás eljövetelel bármely fizikai termék elkészítési költsége fontonként centekre fog csökkenni. A folyamatot irányító információé úgyszintén. Az utóbbi jelenti a valódi értéket. Már nem vagyunk annyira messze ettől a valóságtól; a tervezéstől és az anyagbeszerzéstől az automatizált gyárak összeszerelő soraiig a mai gyártás összes lépését szoftveralapú folyamatok vezetik. A gyártott termékek ára a létrehozásuk során termékkategóriánként változó, de mindenhol egyenlő arányban, hamarosan a 100%-ot megközelítően növekvő információs folyamatoknak tulajdonítható. A 2020-as évek végére gyakorlatilag az összes termék – ruhák, élelmiszer, energia és természetesen az elektronika – értékét szinte teljesen a bennük lévő információ határozza meg. A jelenhez hasonlóan minden termék- és szolgáltatástípusnak egyszerre lesz védett és nyílt forráskódú változata is.

Szellemi tulajdon. Ha a termékek és szolgáltatások elsődleges értéke az információban rejlik, akkor az információra vonatkozó jogok védelme kritikussá válik az értékes információ létrehozását anyagilag biztosító üzleti modellek támogatásában. A szórakoztatóiparnak a zenék és filmek illegális letöltése ellen folytatott jelenlegi csatározásai kemény harc előhírnökei. Ez a harc akkorra várható, amikor már az összes érték információból épül fel. Az értékes szellemi tulajdon (*intellectual property*, IP) létrehozását biztosító üzleti modelleket egyértelműen védeni kell, máskülönben maga a szellemi tulajdon előállítása kerül veszélybe. Mindazonáltal, a kényelmes információmásolás miatti nyomás létező valóság, nem szűnik meg, és ha üzleti modelljei nem tartanak lépést a közelvárásokkal, az ipar sokat fog szenvedni.

Például zenei téren helyett, hogy az új paradigma vezetője lenne, a lemezipar (egészen mostanáig) görcsösen ragaszkodott a drága album koncepciójához; egy olyan üzleti modellhez, amely szinte semmit nem változott apám ifjúsága óta, amikor az 1940-es években zenészként küszködött. A közönség csak akkor hagy fel a kalózkodással az információs szolgáltatások széles skáláján, ha a kereskedelmi árakat ésszerűnek vélt szinten tartják. A mobiltelefon-szektor tökéletesen példázza a kalózkodásra nem csábító iparágakat. A technológia javulásával csökken a hívások költsége. Ha a mobiltelefon-ipar azon a szinten tartotta volna az árakat, mint amikor gyerek voltam (abban az időben, ha valaki távolsági hívást kezdeményezett, az emberek abbahagytak mindent, amivel épp foglalatostkodtak), a mobiltelefon-hívásokat hasonló – a zenék másolásánál technikailag nem nehezebb – kalózkodások fenyegetnék. De mivel a közvélemény szerint korrektek az árak, általában bűnös cselekedetnek tartjuk a hívásokkal kapcsolatos csalásokat.

Az IP üzleti modellek mindig a változás határán vannak. A filmeket a fájlok nagysága miatt volt nehéz letölteni, de ez is egyre kevésbé okoz problémát. A filmiparnak élen kell járnia az új szabványokért, mint például a kívánság szerinti HD-filmért vívott harcban. A zenészek tipikusan élő fellépésekkel keresik a legtöbb pénzt, ám a következő évtized elején, a teljes bemerülést kínáló virtuális valósággal ezt a modellt is támadások érhetik. Az összes iparágnak folyamatosan újra fel kell találnia üzleti modelljeit, amihez ugyanannyi kreativitás kell, mint magának a szellemi terméknek a létrehozásához.

Az első ipari forradalom testünk határait bővítette ki, a második elménkét bővíti majd. Ahogy már említettem, a múlt században a gyárakban és farmokon alkalmazottak száma az Egyesült Államokban 60%-ról 6%-ra csökkent. A következő évtizedekben virtuálisan az összes fizikai és szellemi rutinmunka automatizálttá válik. A számítógépes műveletek és a kommunikáció nem fog kiterjedni különálló termékekre, például kézi eszközökre, viszont a körülöttünk lévő összes intelligens forrás észrevétlen hálóját jelenti majd. Már a legtöbb mai munka is magában foglalja a szellemi termékek ilyen-olyan formáinak létrehozását és promotálását, akár csak a személyek közötti közvetlen személyes szolgáltatásokat (egészségügy, állóképesség, oktatás és így tovább) is. Az egyre több szellemi tulajdon – beleértve művészi, szociális és közösségi kreativitásunk minden termékét – megalkotására irányuló trendek folytatódnak, és jelentősen bővülnek tudatunk nem biológiai intelligenciával való egyesülésének köszönhetően. A személyes szolgáltatások nagy része virtuálisvalóság-környezetekbe költözik – különösen akkor, amikor a virtuális valóság kezdi körbevenni összes érzékszervünket.

Decentralizáció. A következő néhány évtized egyik legfontosabb trendje a decentralizáció felé mutat. A mai erőművek erősen centralizáltak és sebezhetőek, az energia szállítása hajókkal és csővezetékeken keresztül történik. A nanotervezett üzemanyagcellák és a napenergia használatának eljövetele lehetővé teszi az energiaforrások tömeges, pontos elosztását, infrastruktúránkba integrálásukat. Az olcsó nanogyártó minigyárakat használó MNT-alapú ipar szintén erősen elosztott lesz. Az a képesség, hogy bármely virtuálisvalóság-környezetben, bárhol és bárkivel szinte bármit megcsinálhatunk, elavulttá teszi az irodaépületek és városok jelentette központosított technológiát.

A tesztek tetszés szerinti, különféle formákká átalakulni képes 3.0-s változatával és a biológia által „adományozott” korlátozott architektúrától immár független, túlnyomórészt nem biológiai agyunkkal alapos kivizsgálásra szorul a „mi az emberi?” kérdése. Az itt leírt valamennyi átalakulás nem hirtelen ugrás, hanem inkább apró lépések sorozata. A lépések megtétele ugyan sietős, de nagy általánosságban a fősodor is gyorsan elfogadja. Vegyük figyelembe, hogy például az olyan új szaporodási technológiák, mint az *in vitro* megtermékenyítés először ellentmondásosnak tűntek, de

hamarosan széles körben használták és elfogadták őket! Másrészt, a változások mindig kiváltanak az ütemük növekedésével egyre erőteljesebbé váló fundamentalista és luddita ellenlépéseket. Ám a kétségtelen ellentmondás dacára gyorsan egyértelművé válik az emberi egészség, gazdagság, kifejezési formák, alkotókedv és tudás szédítő nyeresége.

...a játékra

„A technológia a világegyetem rendszerezésének módja – azért, hogy ne kelljen átélnünk.”

(Max Frisch: Homo Faber)

„Az élet vagy merész kaland, vagy semmi.”

(Helen Keller)

A játék csak egy másik változata a munkának; összes formájában bensőséges szerepet játszik az emberi tudás felhalmozásában. A babákkal és kockákkal játszó gyerek saját élményein keresztül szerzi meg az ismereteket. A táncmozdulatokkal játszó emberek együttműködő alkotói folyamatban vesznek részt (gondoljunk a nemzet legszegényebb környékeinek utcáinak felnőtt kölykökre, akik létrehozták például a hip-hop mozgalmat elindító break táncot!). Einstein félretette svájci szabadalmi hivatalnokként végzett munkáját, és játékos elmekísérletekbe kezdett. A speciális és általános relativitás maradandó elméletének a megalkotása lett az eredmény. Ha a háború a feltalálás apja, akkor a játék az anyja.

Már ma sincs egyértelmű különbség az egyre kifinomultabb videojátékok és az oktatási szoftverek között. A 2004 szeptemberében forgalomba került *The Sims 2* saját motivációkkal és szándékokkal rendelkező MI-alapú karaktereket használ. Az előregyártott forgatókönyv nélküli karakterek kiszámíthatatlanul viselkednek, interakcióikból bontakozik ki a történetvonal. Bár játéknak tartják, a benne részt vevők számára a közösségi tudatosság kialakulásába enged betekintést. Akárcsak a sportokat egyre valóságosabb részletekkel és megértéssel szimuláló játékok.

A 2020-as évekre a teljes bemerülést kínáló virtuális valóság lenyűgöző környezetek és élmények óriási játszótere lesz. A VV kezdetben a másokkal való kommunikációt vonzó formákban, nagy távolságból és a kiválasztható környezetek széles skáláját nyújtva teszi lehetővé. Ezért lesz hasznos. A környezetek először nem lesznek teljesen meggyőzőek, a 2020-as évek végére viszont már nem lehet megkülönböztetni őket a tényleges valóságtól. Kiterjednek az összes érzékszervünkre és érzelmeink neurológiai megfelelőire is. A 2030-as évekbe lépve ember és gép, valódi és virtuális valóság, vagy munka és játék között nem lesz többé nyilvánvaló különbség.

...a kozmosz intelligens sorsára: miért vagyunk valószínűleg egyedül a világegyetemben

„A világegyetem nemcsak különösebb, mint azt feltételezzük, hanem még annál is különösebb, mint azt képesek lennénk feltételezni.”

(J. B. S. Haldane)

„Vajon az univerzum miért kérdőjelezi meg magát egyik legkisebb teremtményén

keresztül?”

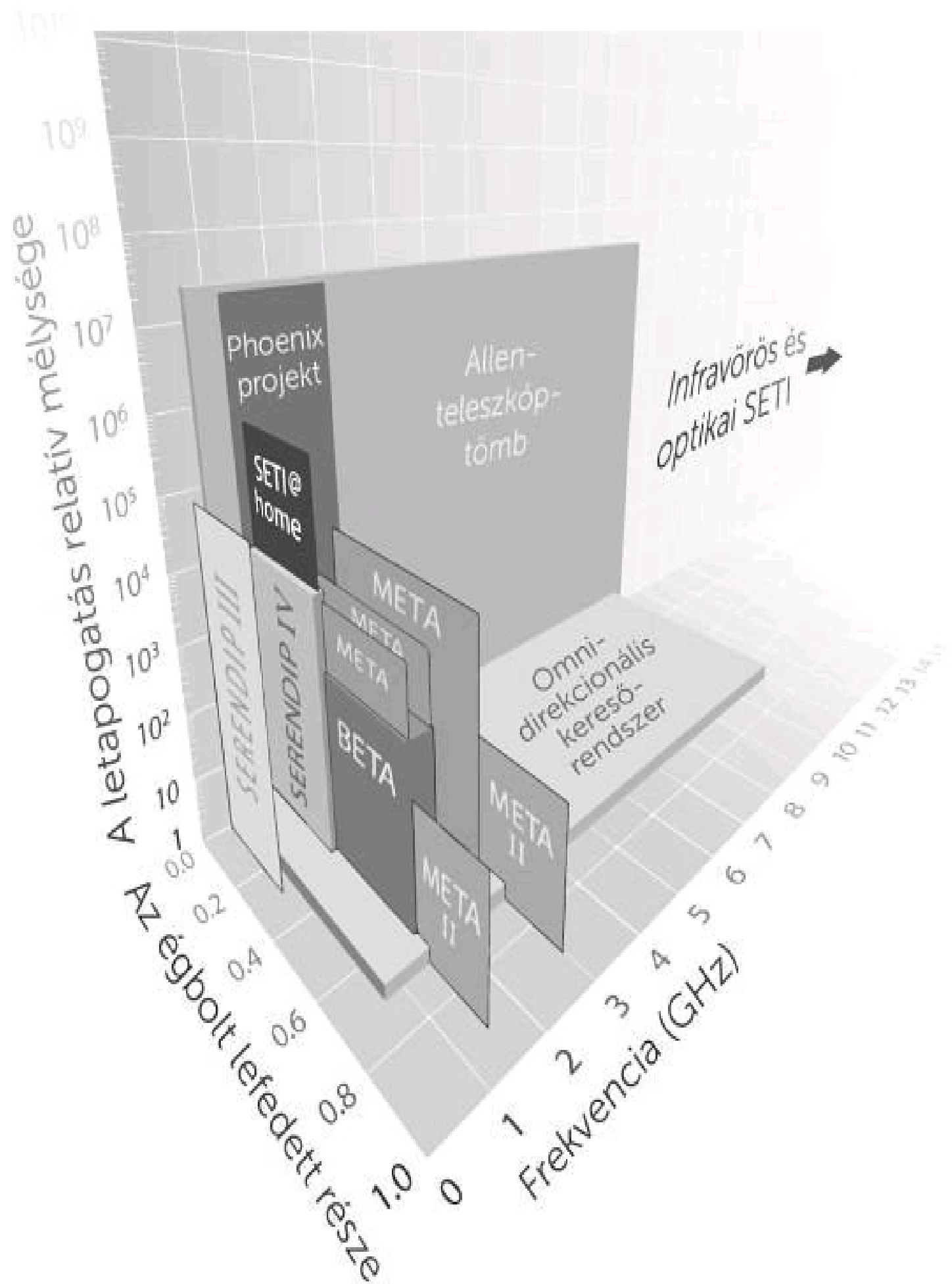
(D. E. Jenkins, anglikán teológus)

„Min dolgozik az univerzum? Jelenlegi tudásunk alapján azt mondhatjuk, nem kérdésekre keresi a választ... Ehelyett önmagát számítja ki. A standard modell szoftver vezérelte univerzum-kvantummezőket, vegyületeket, baktériumokat, emberi lényeket, csillagokat és galaxisokat teremt. Számításai közben pedig a fizika törvényei által megengedett legvégső pontossággal leképezi saját téridő-geometriáját. A számítás maga a lét.”

(Seth Lloyd és Y. Jac Ng)^{[\[617\]](#)}

A Kopernikusz előtti időkből származó naiv kozmoszértelmezésünk szerint a Föld helyezkedik el a világegyetem középpontjában, és az emberi intelligencia annak legnagyobb ajándéka (Isten után). A mai, tudományosabb nézet szerint annak a valószínűsége, hogy egy csillagrendszerben technológiateremtő fajnak otthont adó bolygó legyen, rendkívül kicsi (például egy a millióhoz), az univerzumban mégis olyan sok (soktrillió) csillag van, hogy közülük bizonyosan több (akár milliárd vagy billió) is rendelkezhet fejlett technológiával.

A SETI – (*Search for Extraterrestrial Intelligence* – „a földön kívüli élet után kutató” program) – ezt a megközelítést képviseli, és a jól értesült emberek általában osztják ezt a nézetet. Ám több okunk is van kételkedni a SETI azon feltevésében, hogy a földön kívüli intelligencia olyan gyakori jelenség lehet.



Először is, vegyük a SETI közismert nézőpontját! A Drake-egyenlet (lásd később) leggyakoribb értelmezései arra a következtetésre vezetnek, hogy sok (több milliárd) ETI (földön kívüli intelligencia) népesíti be a világegyetemet, és csak a mi galaxisunkban több ezernek vagy akár több milliónak kell lennie. Eddig még csupán a szalmazsal (az univerzum) elenyésző részét vizsgáltuk meg, így a tű (ETI) megtalálásának sikertelensége nem kell hogy eltántorítson. Próbálkozásaink hatékonysága egyre fokozódik.

A *Sky & Telescope* című magazinból vett fenti ábra jól érzékelteti a SETI-projekt léptékeit azáltal, hogy a különböző letapogatási kísérletek eredményességét három fő paraméter, a Földtől való távolság, az adás gyakorisága és az égbolt egy szelete mentén ábrázolja. ^[618]

A grafikon két befejezésre váró rendszert is tartalmaz. A Microsoft egyik alapító tagjáról, Paul Allenről elnevezett Allen-teleszkóptömb (*Allen Telescope Array*) sok kisebb tányérantennát, vagy kevesebb, ám nagyobb méretű tányért fog használni, amelyek közül harminckettő működésbe hozását 2005-re tervezik ^[16]. Amikor mind a 350 antenna működésbe lép, egy 1 hektáros tányérnak megfelelő (10 000 m²) antenna kapacitásával fognak működni. Egyszerre lesz képes fogni százmillió frekvenciasávot, és lefedi majd a teljes mikrohullámú tartományt. Egyik tervezett célja a galaxisunk több millió csillagának végigpásztázása. A projekt azokon a számításokon alapul, melyek a sok alacsony költségigényű tányérantenna együttes kimenetéből rendkívül pontos jeleket tudnak előállítani. ^[619]

Az Ohioi Állami Egyetem emellett egy omnidirekcionális, azaz minden irányba figyelő keresőrendszert épít, amely szintén sok egyszerű antennából kinyert jel intelligens értelmezésén alapul. A különböző jelek interferenciájára épülő ún. interferometria segítségével a teljes égbolt nagy felbontású képe kiszámolható a több antennából vett adatokból. ^[620] Más projektek a figyelt frekvenciatartományt bővítik, például az infravörös és optikai elektromágneses jelekre koncentrálnak. ^[621]

Az előző ábrán bemutatott három paraméter mellett hat másik is szerepel, például a polarizáció (a hullámok rezgési síkja a terjedési irányhoz képest). A fenti ábrából levonható egyik következtetés az, hogy a SETI eddig ennek a kilencdimenziós „paraméterternek” csupán nagyon vékony szeleteit derítette fel. Az érvelés szerint nem is kell csodálkoznunk, hogy eddig még nem bukkantunk ETI-k nyomára.

Ámde nem csupán egyetlen tűt keresünk a szalmazsalban. A gyorsuló megtérülések törvénye alapján, ha egy ETI képessé válik primitív mechanikus technológiák előállítására, csak néhány évszázad választja el attól, hogy elérje azokat a hihetetlen képességeket, amelyeket én a Föld XXII. századára jósoltam. Az orosz csillagász, N. Sz. Kardasev szerint a „II. típusú” civilizációk már felhasználják a napjuk energiáját (a mi Napunkból kiindulva ez körülbelül 4×10^{26} watt teljesítményt jelent) elektromágneses sugárzás alapú kommunikációra. ^[622] Ha a jóslataim beigazolódnak (lásd a harmadik fejezetet), a civilizációnk a XXII. századra eléri ezt a szintet. Tekintve, hogy a SETI teoretikusai által jósolt megannyi civilizáció technológiai fejlettségi szintje mérhetetlenül nagy időszakban oszlik el, sok civilizációnak már jóval előttünk kell járnia. Így hát bizonyosan számos II. típusú civilizáció létezik. Valójában még ahhoz is elég idő telhetett el, hogy némelyik civilizáció gyarmatosítsa a galaxisát és elérje Kardasev III. szintjét: olyan civilizációvá váljon, amely hasznosítja galaxisa energiáját (saját galaxisunk alapján számítva körülbelül 4×10^{37} watt). Még egyetlen fejlett civilizációnak is több milliárd vagy több billió „tű” – azaz a SETI paraméterterében megannyi pontot képviselő, a civilizáció kismilliónyi információs folyamatából következő eszköznek és mellékhatásnak megfelelő adást – kellene kibocsátania. Még ha a SETI csupán a paraméterter vékonyka szeleteit tapogatta is le, lehetetlen lett volna nem észrevenni egy II.

típusú civilizációt, hát még egy III. típusút! Ha még azt is hozzá vesszük, hogy igazából várva várjuk eme hatalmas számú fejlett civilizáció felbukkanását, fura, hogy eddig nem vettük észre őket. Ezt nevezzük Fermi-paradoxonnak.

A Drake-egyenlet. A SETI kutatását nagyrészt Frank Drake csillagász 1961-es egyenlete ihlette, amelyben Drake megbecsülte a galaxisunkban élő intelligens (vagy még pontosabban, rádióadásra képes) civilizációk számát.^[623] (Feltételezése szerint ugyanez az elemzés igaz a többi galaxisra is.) Vegyük most a SETI alapfeltevését a Drake-képlet szemszögéből, amely kimondja, hogy:

$$\text{A rádióadásra képes civilizációk száma} = N \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times f_L$$

ahol

N : a Tejútrendszerben található csillagok száma. Jelenlegi becslések alapján ezt százmilliárd körülre tesszük (10^{11}).

f_p : a bolygókkal rendelkező csillagok aránya. Jelenlegi becslések alapján értéke körülbelül 20–50 százalék között lehet.

n_e : Átlagosan hány lakható bolygó jut az egyes bolygórendszerrel rendelkező csillagokra? Ennek értéke meglehetősen vitatott. Egyes becslések egyre vagy annál magasabbra teszik a számot (azaz minden bolygórendszerrel rendelkező csillagnak van átlagban legalább egy lakható bolygója), mások sokkal alacsonyabbra, például egyezredre vagy annál kevesebbre.

f_l : A lakható bolygók közül vajon hányon alakult ki valóban az élet? A becslések terén itt már mindenféle számokkal találkozunk, a nem egészen 100%-tól a 0%-ig.

f_i : Az élettel rendelkező bolygók hány százalékán fejlődött ki intelligens élet? Az f_l és f_i a Drake-egyenlet legellentmondásosabb tényezői. A becslések itt is a 100%-tól (azaz ahová az élet egyszer beteszi a lábát, oda hamarosan az intelligens élet is követi) a közel 0%-ig (azaz az intelligens élet nagyon ritka) terjednek.

f_c : Az összes intelligens élettel rendelkező bolygónak mekkora százaléka kommunikál rádióhullámok útján? Az f_c értékére adott becslések általában magasabbak, mint az f_l és f_i esetén, abból az (ésszerű) érvből kiindulva, hogy ha egyszer már jelen van egy intelligens faj, a rádiókommunikáció felfedezése és használata valószínűvé válik.

f_L : annak az időszaknak a hossza, amíg egy átlagos, kommunikációképes civilizáció rádióhullámokkal kommunikál, az univerzum teljes életkorához képest.^[624] Ha a civilizációkat vesszük példának, az univerzum durván tíz-húszmilliárd éves történetéhez viszonyítva mi száz éve használunk rádiókommunikációt, így hát a Földre számított f_L eddig körülbelül 10^{-8} . Amennyiben még úgy kilencszáz évig folytatjuk ezt a szokásunkat, a tényező 10^{-7} -re változik. Erre a tényezőre több megfontolás is hatással van. Ha egy civilizáció elpusztítja önmagát, mert képtelen megzabolázni a rádiókommunikációval együtt kifejlődő technológiák (mint a nukleáris magfúzió vagy az önsokszorozó nanotechnológia) pusztító erejét, akkor a rádióadás megszűnik. Már láttunk példát olyan civilizációra a Földön (például a majákét), amelynek szervezett társadalma és tudományos fejlődése hirtelen szűnt meg. Másrésztől valószínűtlennek tűnik, hogy minden civilizáció így végzi, tehát a hirtelen pusztulás minden bizonnyal csekély részt vállal a rádióképes civilizációk számának csökkentésében.

Egy másik, még fontosabb probléma lehet az, hogy a civilizációk elektromágneses adásokról (azaz rádióról) nagyobb teljesítményű kommunikációs eszközökre térnek át. Itt a Földön mi a

rádióadásokról sebesen a vezetékes kommunikációra váltottunk, kábelt és száloptikát alkalmazva a távközlésben. Így hát az általános kommunikációs sáv szélességben történő hatalmas fejlődés ellenére a bolygónkról az űrbe küldött elektromágneses információ mennyisége az elmúlt évtizedben jobbra stagnált. Másrészt egyre több lehetőségünk van a drót nélküli kommunikáció alkalmazására (például a mobiltelefonok és az új internetes wireless protokollok, mint a most megjelenő WiMAX szabvány esetén). A drótok használata helyett a kommunikáció esetleg teljességgel egzotikus közegekre is építhet, mint amilyenek a gravitációs hullámok. Ám még ebben az esetben is – bár az elektromágneses kommunikáció talán már nem forradalmi eleme egy adott ETI távközlési technológiájának –, legalább néhány felhasználási területen továbbra is érvényben marad. (Akárhogy is, az f_L azt a lehetőséget is figyelembe veszi, hogy az adott civilizáció leállítja az adásokat.)

Egyértelműnek tűnik, hogy a Drake-egyenlet számos meghatározhatatlan faktort tartalmaz. Több SETI-hívő alapos vizsgálatok után arra jutott, hogy a képlet alapján jelentős számú rádióképes civilizációnak kell léteznie még a mi galaxisunkban is. Például, ha azt feltételezzük, hogy a csillagok ötven százalékának vannak bolygói ($f_p = 0,5$), hogy minden ilyen csillagnak átlagban két lakható bolygója van ($n_e = 2$), hogy ezen bolygók felén ténylegesen kifejlődött az élet ($f_i = 0,5$), hogy ezen bolygók felén intelligens élet alakult ki ($f_l = 0,5$), hogy ezek fele rádióképes ($f_c = 0,5$), és hogy az átlagos rádióképes civilizáció egymillió éve sugározza a jeleit ($f_L = 10^{-4}$), a Drake-egyenlet szerint 1 250 000 rádióképes civilizáció létezik a galaxisunkban. A SETI Intézet vezető csillagásza, Seth Shostak számításai szerint a Tejútrendszerben valahol tízezer és egymillió csillag között van azok száma, amelyek rádióadásra képesek.^[625] Carl Sagan egymillió körülire tette a számukat a galaxisunkban, míg Drake úgy tízezret számolt.^[626]

Azonban a fenti értékek kétségtelenül nagyon magasak. Ha konzervatívabb feltételezésekkel élünk az élet – hát még az intelligens élet – kifejlődési nehézségeit illetően, nagyon különböző eredményt kapunk. Amennyiben a bolygóval rendelkező csillagok számát ötven százalékának hagyjuk ($f_p = 0,5$), a lakható bolygók számát csupán egy tizedre csökkentjük ($n_e = 0,1$) arra a megfigyelésre alapozva, hogy az életet támogató feltételek kevésbé jellemzőek), és azt feltételezzük, hogy az élet csak az adott bolygók egy százalékán alakult ki ($f_i = 0,01$, az élet beindulásának nehézkességét alapul véve), hogy ezeknek az életet előállító bolygóknak csak öt százalékán fejlődött ki intelligens élet ($f_l = 0,05$, arra alapozva, milyen sokáig tartott ez a Földön is), hogy ezeknek a fele rádióképes ($f_c = 0,5$), valamint, hogy az átlagos rádióképes civilizáció tízezer éve sugároz ($f_L = 10^{-6}$), a Drake-egyenlet szerint körülbelül egy (pontosabban 1,25) rádióképes civilizáció létezik a Tejútrendszerben. És egy ilyet már ismerünk.

Végül is nehéz hathatósan az ETI ellenében vagy mellett érvelni a Drake-egyenlet alapján. Ha a Drake-képlet mond nekünk valamit, az az, milyen rendkívül bizonytalanok is a becsléseink. Azonban annyit tudunk, hogy a kozmosz némának tűnik – azaz eddig nem találtuk ETI-üzenetek meggyőző jelét. A SETI mögött az az elképzelés áll, hogy az élet – és az intelligens élet – olyannyira uralkodó jellegű, hogy több millió, ha nem több milliárd rádióképes civilizációnak kell lennie az univerzumban. (Vagy legalábbis a mi fénygömbünkben; ami alatt az a térrész értendő, amelyen belül az esetleges rádióadó civilizációknak elég idejük volt arra – mert nem voltak ehhez túlságosan távol tőlünk –, hogy az általuk kibocsátott elektromágneses hullámok mára elérjék a Földet.) Eddig azonban a SETI ellenére egy sem jelentkezett. Így hát vegyük a SETI alapfeltételezését a rádióképes civilizációk számáról, de tekintsük meg a gyorsuló megtérülések törvénye szempontjából! Mint már tárgyaltuk, az evolúciós folyamatok belülről felgyorsulnak. Továbbá a technológia fejlődése sokkal gyorsabb, mint a technológiateremtő fajt létrehozó evolúciós folyamat. A Földön mindössze kétszáz év alatt jutottunk el

egy elektromosság előtti, komputereket nélkülöző és lóerővel közlekedő társadalomból a mai kifinomult számítógépes és kommunikációs technológiákig. Jóslataim azt mutatják, hogy egy újabb évszázad alatt több billiószor billiónyi mértékben megsokszorozzuk majd az intelligenciánkat. Így hát mindössze háromszáz év elegendő lesz arra, hogy a primitív mechanikus technika korai megjelenésétől eljussunk intelligenciánk és kommunikációs képességünk hihetetlen mértékű kiterjesztéséhez. Tehát ha egy faj egyszer megteremti az elektronikát és a rádióadás sugárzásához szükséges fejlett technológiát, onnan már csupán néhány évszázad kérdése, hogy addig nem látott mértékben kiterjessze intelligenciáját.

A Földön beálló változások háromszáz éve kozmológiai szinten röpke időszakasznak számít, hiszen az univerzum korát tizenhárom-tizennégy milliárd évre teszik.^[627] A modellem azt sugallja, hogy ha egyszer egy ETI-civilizáció eléri saját rádiókommunikációs szintjét, onnantól mindössze egy – legfeljebb két – évszázad alatt II. típusú civilizációvá fejlődhet. Ha elfogadjuk a SETI alapfeltevését, miszerint sok ezer, vagy akár sok millió rádióképes civilizáció létezik galaxisunkban, ennél fogva pedig több milliárd ilyen létezik a mi fénygömbünkben – ezek a civilizációk minden bizonnyal a fejlettség különböző, egymástól több milliárd fényévre lévő szintjein állnak. Némelyik tőlünk lemaradva, mások pedig előttünk haladva fejlődnek. Nem hihető az, hogy minden nálunk fejlettebb civilizáció csupán alig néhány évtizeddel jár előttünk. A legtöbb ilyennek legalább évmilliókkal, ha nem évmilliárdokkal fejlettebbnek kell lennie.

Azonban mivel néhány évszázad elegendő a mechanikai technológiáktól eljutni a szingularitás intelligencia- és kommunikáció-kiterjesztő hatásáig, a SETI feltételezése szerint fénygömbünknek több milliárd olyan civilizációt kellene tartalmaznia (több ezret vagy több milliót csak a mi galaxisunkban), amelyek technológiailag elképzelhetetlenül fejlettebbek nálunk. A SETI-projekt egyes vonalainál ugyanazt a lineáris gondolkodást látjuk, amely minden egyéb tudományágat is áthat: azaz, ha egy civilizáció eléri a mi fejlettségi szintünket, akkor technológiája onnan fokozatosan, évezredek vagy évmilliók során fog fejlődni. Ám az ugrás a rádióképesség első jeleitől a II. típusú civilizációig és azon is túl mindössze néhány évszázad alatt megtehető. Az égboltnak mostanra már izzania kellene az intelligens földön kívüli rádióüzenetektől.

De az égbolt néma. Fura, hogy a kozmoszt ilyen csendesnek találjuk. Enrico Fermi 1950-ben azt kérdezte, és mi is megtehetnénk ma: „Hol vannak a többiek?”^[628] Egy eléggé fejlett civilizáció valószínűleg nem korlátozná rádióadásait ismeretlen frekvenciákon küldött, nehezen fogható jelekre. Akkor meg miért ilyen félszegek az ETI-k?

Sokan próbálkoztak magyarázatot adni az úgynevezett Fermi-paradoxonra (ami csak akkor jelenik meg paradoxonként, ha az ember elfogadja a Drake-egyenletre leggyakrabban alkalmazott optimista paramétereket). Az egyik leggyakoribb válasz az, hogy egy civilizáció megsemmisítheti magát, amint eljutott a rádióképesség szintjére. Ez a magyarázat elfogadható lenne, ha csupán néhány ilyen civilizációról beszélénk, ám a SETI szerint több milliárd civilizáció létezik, és nem valószínű, hogy mindegyikük elpusztította magát.

Más érvelések ugyanezen a vonalon haladnak. Talán úgy „döntöttek”, hogy nem zavarnak minket (lévén, hogy túl primitívek vagyunk), és csak csendben figyelnek (egy etikai alapelv, amely ismerős lehet a *Star Trek*-rajongóknak). Ebben az esetben is nehezen hihető, hogy a több milliárd civilizáció mindegyike ugyanezt a döntést hozta. Vagy talán sokkal fejlettebb kommunikációs paradigmákra váltottak. Hiszem, hogy létezhet még a legmagasabb frekvenciájú elektromágneses hullámoknál is fejlettebb kommunikációs módszer, és hogy egy fejlett civilizáció (mint amilyenek mi is leszünk a következő évszázad során) felfedezheti és felhasználhatja ezt a tudást. Azonban nagyon valószínűtlen, hogy a több milliárd civilizáció egyike sem hagy szerepet az elektromágneses hullámoknak, akár más

technológiai folyamatok melléktermékeként.

Ezt az érvet persze nem a SETI-projekt ellen hozom. A SETI-nek elsőbbséget kell biztosítani, hiszen a negatív eredmény is ugyanolyan fontos, mint a siker.

Még egyszer a számítástechnika korlátairól. Nézzük meg a gyorsuló megtérülések törvényének a kozmosz intelligenciájára gyakorolt további hatásait! A harmadik fejezetben szó esett a hideg laptopról, amikor egy egyliteres, egykilós számítógép optimális számítástechnikai kapacitását körülbelül másodpercenkénti 10^{42} számításra becsültük, ami tízmilliárd emberi agy tízezer évnyi gondolkodását képes tíz mikroszekundum alatt elvégezni. Ha okosabban tudjuk megoldani az energiafelhasználás és a hőleadás kérdését, egy kilogramm anyag számítástechnikai kapacitása akár másodpercenkénti 10^{50} számításra is emelkedhet.

Az ilyen mérvű számítástechnikai kapacitás eléréséhez szükséges technikai feltételek rémisztőek, de mint már rámutattam, a gondolat kísérletben egy 10^{42} cps per kilogramm műszaki képességű civilizációt kell elképzelni, és nem a ma emberének korlátozott műszaki képességével kell számolni. Egy 10^{42} cps-es civilizáció valószínűleg rájön, miként léphet tovább 10^{43} cps-re, majd 10^{44} cps-re és így tovább. (Valójában minden lépésnél ugyanazt az érvet hozhatjuk fel.)

Ha egy civilizáció egyszer eléri ezt a szintet, nyilvánvalóan nem fogja számítástechnikai képességeit egy kilogramm anyagra korlátozni, amint azt mi sem tesszük ma. Vegyük számba, mit érhet el civilizációnk a környezetünkben lévő tömeggel és energiával! A Föld tömege körülbelül 6×10^{24} kilogramm. A Jupiter tömege körülbelül $1,9 \times 10^{27}$ kilogramm. Ha a hidrogént és héliumot nem vesszük figyelembe, körülbelül $1,7 \times 10^{26}$ kilogramm tömegű anyag van jelen a Naprendszerben a Naptól eltekintve (amely egyébként is szabad préda). A Nap által uralt teljes Naprendszer tömege körülbelül 2×10^{30} kilogramm. Durva felső értékhatáros elemzés esetén, ha a Naprendszer tömegét az anyag kilogrammjának általunk becsült számítástechnikai kapacitásának felső határára (10^{50} körül) alkalmazzuk (a nanokomputerizáltság határait alapozva), a „közeli környezetünkben” 10^{80} cps számítástechnikai teljesítmény határértéket kapunk.

Természetesen bizonyos gyakorlati nehézségek valószínűleg nehezé teszik a felső határ elérését, de még ha a Naprendszer anyaga egy százalékának egy huszad részét (0,0005) is szánjuk számítástechnikai és kommunikációs nyersanyagnak, 10^{69} cps kapacitást kapunk „hideg” és 10^{77} cps-t „meleg” számítástechnikai tevékenységünk határértékére. ^[629]

Történetek műszaki becslések ilyen szinten a számítástechnikai kapacitás kiszámítására, amelyek figyelembe vették a különféle komplex tervezési követelményeket, mint például az energiafelhasználást, hőelvezetést, belső kommunikációs sebességeket, a Naprendszer anyagának összetételét és további tényezőket. Ezek a modellek reverzibilis számítást használtak, ám amint arra a harmadik fejezetben rámutattunk, még ekkor is figyelembe kell vennünk a hibajavítás és a kommunikációs eredmények energiafelhasználását. Anders Sandberg, a komputációs idegtudomány képviselője elemzésében felmérte egy hipotetikus Föld méretű számítástechnikai „objektum” számítástechnikai kapacitását. ^[630] Az objektumot Zeusznak nevezte el. A körülbelül 10^{25} kg gyémánt szerkezetű szénből (a Föld 1,8-szorosa) álló „hideg” komputer konceptuális modellje 5×10^{37} számítási csomópontból áll, melyeknek mindegyike extenzív párhuzamos feldolgozásra képes. A Zeusz becsült számítási maximuma 10^{61} cps, vagy 10^{47} bit adattárolás esetén. A modell elsődleges korlátja a bittörlések megengedett száma (maximum $2,6 \times 10^{32}$ bittörlés másodpercenként), amely alapvetően a kozmikus sugárzás és kvantumhatások okozta hibák javítására szolgál.

1959-ben az asztrofizikus Freeman Dyson koncepciójában csillagok köré épített héjakat javasolt,

amelyek energiát és élőhelyet biztosítanak egy fejlett civilizáció számára. A Dyson-gömb egyik modellje szó szerint egy csillag köréépített, vékony energiagyűjtő gömb lenne.^[631] A civilizáció a gömbön belül élne, annak felszínén, és hőt (infravörös energiát) adna le a gömbön kívülre (a csillaggal ellentétes irányba). A Dyson-gömb másik (gyakorlatiasabb) változatában teljes gömb helyett egy sor ívelt héj szerepel, melyek mindegyike a csillag sugárzásának csak egy részét fogja be. Így a Dyson-héjak nincsenek hatással a meglévő bolygókra, főként az olyanokra, amelyek a Földhöz hasonlóan védelemre szoruló ökológiával rendelkeznek.

Bár Dyson modellje egy fejlett *biológiai* civilizációnak biztosítana nagy mennyiségű helyet és energiát, csillagméretű komputerok alapjául is szolgálhat. Ilyen Dyson-héjak keringhetnének a Napunk körül anélkül, hogy hatással volnának a Földet elérő napfényre. Dyson intelligens biológiai lényeket képzelt el, akik héjak vagy gömbök felszínén élnének, ám mivel egy számítástechnikát felfedező civilizáció sebesen halad a nem biológiai intelligencia felé, nem volna értelme biológiai emberekkel benépesíteni a héjakat.

A Dyson-konceptió újabb módosításaként az egyik héj által termelt hőt fel lehetne fogni, amit egy másik, a naptól távolabb elhelyezett, párhuzamos helyzetű héj hasznosíthatna. A számítógéptudós Robert Bradbury hangsúlyozza, hogy akármilyen számú héj létezhet. Bradbury egy találóan „Matrjoska-agynak” nevezett számítógépet javasol, amely héjak a Nap vagy egy másik csillag köré rendezett sorozatából állna. A Sandberg által elemzett egyik ilyen konceptuális modell neve Uránosz, amely a terv szerint a Naprendszer hidrogénen és héliumon kívül fennmaradó tömegének 1 százalékát használná (kivéve a Nap anyagát), más szóval körülbelül 10^{24} kilogrammot, valamivel kevesebbet, mint a Zeus.^[632] Az Uránosz körülbelül 10^{39} számítási csomópontot tartalmazna, számítástechnikai kapacitása 10^{51} cps lenne, és 10^{52} bitet tudna tárolni.

A számítógépes technológia már most is széles körben elterjedt – és nem centralizált – erőforrás, és jóslataim szerint a tendencia erőteljesebb decentralizáltság felé halad. Ám amint civilizációnk eléri a korábban elképzelt számítási sűrűséget, a nagyszámú processzor eloszlása valószínűleg ezen konceptuális modellek jellemzői mentén fog alakulni. Például a Matrjoska-héjak tökéletes módon használnák fel a napenergiát és valószínűleg meg a hőelvezetést. Ne felejtsük el, hogy a második fejezetben taglalt jóslataim alapján az ilyen Naprendszer méretű komputerok számítástechnikai kapacitása még ennek az évszázadnak a végén elérhetővé válhat!

Nagyobb vagy kisebb. Mivel naprendszerünk számítástechnikai kapacitása a 10^{70} – 10^{80} cps tartományba esik, jóslataim szerint a XXII. század elejére elérjük ezeket az értékhatárokat. A számítástechnika története arra tanít bennünket, hogy a komputáció hatása befelé és kifelé egyaránt terjeszkedik. Az elmúlt évtizedekben körülbelül kétfévente emeltük duplájára a számítási elemek (tranzistorok) számát egy adott integrált áramkörüi chipben, ami belső terjeszkedésről árulkodik (azaz az egy kilogramm anyagra eső számítási kapacitás növekedéséről). Ám kifelé is terjeszkedünk, mivel a chipek száma (jelenleg) évente körülbelül 8,3%-kal növekszik.^[633] Nem badarság azt állítani, hogy mindkét típusú növekedés folytatódni fog, valamint, hogy a kifelé terjeszkedés sebessége jelentősen felgyorsul a belső növekedés határainak elérésével (a háromdimenziós áramkörök alkalmazásával).

Továbbá, ha egyszer elérjük a naprendszerünkben elérhető, a számítógépes technológia terjeszkedéséhez szükséges anyagi és energetikai határokat, nem lesz más választásunk, mint hogy elsősorban kifelé terjeszkedjünk. Már korábban tárgyaltuk az elképzelést, miszerint a számítás kisebb léptékekben is elképzelhető – a szubatomi részecskék szintjén. Az ilyen piko- vagy femtotechnológia lehetővé tenné a számítástechnika folytatólagos fejlődését az alkatrészméretek folyamatos

zsugorításával. Talán elképzelhető, azonban minden bizonnyal lényeges technológiai kihívásokkal kell szembenézni a nanoméret alatti számítástechnika kidolgozásának érdekében, így a kifelé terjeszkedés motivációja megmarad.

Terjeszkedés a Naprendszeren túl. Milyen hamar terjeszthetjük ki az intelligenciánkat a Naprendszeren túlra? A terjeszkedés nem maximális sebességgel kezdődik, de gyorsan elér majd egy a maximális sebességnél (a fénysebességnél vagy annál is nagyobb sebességnél) alig kisebb sebességet. Vannak, akik vitatják az elképzelést, azt állítva, hogy rendkívül nehéz lesz embereket (vagy egy ETI-civilizáció fejlett organizmusait) és a felszerelésüket fénysebességhez közeli sebességen utaztatni anélkül, hogy testük összeroppana. Természetesen úgy kerülhetnénk ki ezt a problémát, hogy apránként gyorsítunk, ám akkor is ott van még a csillagközi anyaggal való ütközés kérdése. Azonban ez az ellenvetés is arról árulkodik, hogy az elmélet kritikusan nem értik az intelligencia természetét a fejlettségnek ebben a szakaszában. A galaxisban és az univerzumban elterjedő ETI-ről alkotott első modellek az emberi történelemből vett vándorlási és gyarmatosítási mintákon alapultak, és alapvetően emberi településeket képzeltek el (vagy egyéb ETI-civilizációk esetén intelligens organizmusok településeit) más csillagrendszerekben. Ezek a telepek lehetővé tennék a megszokott biológiai szaporodás útján való sokasodást, és azután hasonló módon terjeszkednének.

Ám amint már láttuk, ennek az évszázadnak a végére a Földön jelen lévő nem biológiai intelligencia több billiószor fejlettebb lesz, mint a biológiai, így nem lesz értelme hús-vér embereket küldeni egy hasonló küldetésre. Ugyanez áll bármely más ETI-civilizációra is. Nem csupán arról van szó, hogy a biológiai emberek robotszondákat küldenek maguk helyett. Az emberi civilizáció addigra talán minden gyakorlati szempontból nem biológiai jellegűvé válik.

Ezeknek a nem biológiai előőrseknek nem szükséges nagyon nagy méretűnek lenniük, és valójában leginkább információból állnának. Az persze igaz, hogy pusztán információt küldeni nem elegendő, mivel valami anyagi eszköznek is jelen kell lennie, amely fizikai hatást gyakorolhat más csillag- és bolygórendszerekre. Mindezek ellenére elegendő volna, ha a szondák önsokszorosító nanobotok lennének. (Ne feledjük, hogy egy nanobot nanoméretű alkatrészekkel rendelkezik, ám teljes mérete mikronokban mérendő!).⁴⁶³⁴¹ Több-billió rajokban indíthatnánk útnak őket, aztán ezek a „magok” meggyökereskezhetnének más bolygórendszerekben és a megfelelő anyagok – szén és más szükséges elemek – fellelésével sokasodhatnának, illetve másolatokat készíthetnének magukról.

Letelepedésük után a nanobot-kolóniák pusztán információátvitel útján megszerezhetnék az intelligenciájuk optimalizálásához szükséges további információkat, ami csupán energia-, nem pedig anyagtovábbítást jelent, így fénysebességgel végrehajtható. Az emberhez hasonló nagy organizmusoktól függetlenül ezek a hallatlanul apró nanobotok közel a fény sebességével tudnának közlekedni.

Egy másik forgatókönyv szerint elvetnénk az információtovábbítást, és a szükséges információt a nanobotok saját memóriájába ágyaznánk. Olyan műszaki döntés ez, amelyet meghagyhatunk a jövő szupermérnökeinek. A szoftverfájlokat megoszthatnánk több milliárdnyi eszköz között. Ha már egy vagy néhány ilyen nanobot önreplikáció útján megtelepszik egy célpontban, a megerősödött rendszer összegyűjthetné a környéken utazó nanobotokat, és így attól a pillanattól fogva a kiküldött nanobotok nagy része nem kerülhetné el az úti célt. Ily módon az addigra kialakult kolónia összeszedhetné az intelligenciájának optimalizálásához szükséges információt és a szétszórt – számítási erőforrásokat.

Újra a fénysebességről. Egy Naprendszer méretű intelligenciának (azaz egy II. típusú civilizációnak) az univerzumban való elterjedéséhez szükséges maximális sebessége nagyon hasonló a fénysebességhez. Jelenleg úgy tudjuk, az információközlés és a materiális tárgyak szállításának maximális sebessége a fénysebességgel egyenlő, de van néhány árulkodó jel, amelyek szerint a fénysebesség talán nem jelenti az abszolút felső határt.

A fénysebesség átlépésének lehetőségét spekulatívnek kell tekintenünk, és a civilizációnkat érintő, ebben az évszázadban végbemenő mélyreható változásokról szóló jóslataim nem is feltételezik ezt. Ám ha lehetséges műszaki megoldást találni a fénysebesség problémájának megkerülésére, az fontos következményekkel jár a sebességre nézve, amellyel gyarmatosíthatjuk intelligenciánkkal az univerzum többi részét.

Nemrégiben végzett kísérletek a fotonok repülési idejét a fénysebesség közel kétszeresére mérték, amely helyzetük kvantumbizonytalanságának eredménye.^[635] Ám ez az eredmény nem igazán hasznos elemzésünk szempontjából, ugyanis valójában nem teszi lehetővé az információ fénysebességnél nagyobb sebességű továbbítását, és minket alapvetően a kommunikáció sebessége érdekel.

Egy másik érdekes jelenség, amely úgy tűnik, a fénysebességnél sokkalta nagyobb sebességeknél történik, a kvantumszétválasztás. Két egyszerre létrehozott részecske „összefonódhat”, azaz míg egy adott tulajdonság (mint például a spinje) nincsen meghatározva egyik részecskében sem, a két részecske közötti bizonytalanság feloldása egyazon pillanatban történik meg. Más szóval, ha a meghatározatlan tulajdonságot megmérjük az egyik részecskében, az a másik részecskében is felveszi a megfelelő értéket ugyanabban a pillanatban, még akkor is, ha a két részecske egymástól távol van. Úgy tűnik, mintha a két részecske között valamiféle kommunikációs kapcsolat lenne.

A kvantumszétválasztás során a fénysebesség sokszorosát mérték, azaz az egyik részecske állapotának meghatározása látszólag olyan időegységen belül határozza meg a másik részecske állapotát, amely kis töredéke annak az időnek, amely alatt az információ fénysebességgel egyik részecskéből a másikba jutna (elméletben az időeltérés nulla). Például dr. Nicolas Gisin, a Genfi Egyetem tudósa kvantum-összefonódott fotonokat küldött ellenkező irányokba a városban húzódó optikai szálakon. Amikor a fotonok hét mérföldre jártak egymástól, mindkettő nekiütközött egy üveglapnak. Mindkét fotonnak „el kellett döntenie”, hogy átmegy a lapon vagy lepattan róla (amely a nem kvantum-összefonódott fotonokkal végzett korábbi kísérletek során véletlenszerűen történt meg). Ám mivel két kvantum-összefonódott fotonról volt szó, ugyanabban a pillanatban ugyanazt a „döntést hozták”. A kísérlet számos ismételése megerősítette a fenti eredményt.^[636]

A kísérletek nem zárták ki végérvényesen egy rejtett változó magyarázatát – vagyis azt, hogy létezik egy nem mérhető állapot, amellyel mindkét részecske rendelkezik, és amely azonos fázisban marad, így amikor az egyiket mérést végzünk (például azzal, hogy döntésre kényszerítjük az üveglappal), a másiknál ennek a rejtett változónak az értéke ugyanaz. Így aztán az azonos értékű rejtett változók azonos „választási” eredményre vezetnek a két esetben. A jelenség magyarázata az azonos kezdeti érték, nem pedig a két részecske közötti kommunikáció. Azonban egyéb problémák miatt a legtöbb kvantumfizikus elutasítja ezt az értelmezést.

De még ha úgy is értelmezzük ezeket a kísérleteket, hogy a két részecske között kommunikáció történik, a fénysebességnél látszólag gyorsabb kommunikációban valójában csak véletlenszerű adatok (tökéletes kvantum os véletlenszerűség) utaznak – nem pedig előre meghatározott információ, mint például egy fájl egyes bitjei. Igaz, e kvantum os véletlen adatok továbbítása sem feltétlenül haszontalan. Bizonyos alkalmazások esetén, például titkosítási rendszerekben ugyanis felhasználható. Két külön helyszínen megkaphatná ugyanazt a véletlenszerű szekvenciát, amelyet aztán az egyik helyszínen

egy üzenet kódolására használhatna, a másik pedig az üzenet dekódolására. Senki más nem tudna belehallgatni a titkosító kódba anélkül, hogy meg ne semmisítené a kvantum-összefonódást, és így fel ne fedné magát. Már ma is léteznek kereskedelmi titkosító termékek, amelyek működésébe beépítették ezt az alapelvet. Ez a kvantummechanika egy előre nem látott felhasználási lehetősége, hiszen fennáll a lehetőség, hogy a kvantummechanika egy másik alkalmazása – a kvantumszámítás – véget vet a titkosítás megszokott, nagy számok tényezőkre bontásával végzett módszerének (amelyet a kvantumszámítás nagyszámú összefonódott kvantumbitjeivel sikerre vihetne).

Egy másik jelenség, ami a fénysebességnél gyorsabb, az a sebesség, amellyel a galaxisok távolodnak egymástól a világegyetem tágulásának következményeként. Ha két galaxis közötti távolság nagyobb, mint az úgynevezett Hubble-távolság, ezek a galaxisok látszólag a fény sebességénél gyorsabban távolodnak egymástól.^[637] Ez nem szegi meg Einstein speciális relativitáselméletét, hiszen a sebességet a tér tágulása okozza, nem pedig a galaxisok saját mozgása. Sajnos ez sem segít nekünk az információ fénysebességnél gyorsabb sugárzásában.

Féregjáratok. Létezik két még elrugaszkodottabb feltételezés, amelyek arra engednek következtetni, hogy megkerülhetjük a fénysebesség látszólagos határát. Az első ilyen a féregjáratok használata. A féregjáratok az univerzumnak a három látható dimenzió kívüli dimenziókban létező görbületei. Nem igazán van itt szó a fénysebességnél nagyobb sebességgel való utazásról, inkább csak arról, hogy a világegyetem topológiája, formája nem az az egyszerű háromdimenziós tér, amit naivan megszoktunk. Ám ha a féregjáratok, más szóval az univerzum gyűrődései mindenütt jelen vannak, ezeken a rövidebb utakon mindenhová gyorsabban eljuthatnánk. Még az is lehet, hogy mi is megépíthetjük őket.

1935-ben Einstein és a fizikus Nathan Rosen megfogalmazta az „Einstein–Rosen”-hidakat, amivel az elektronokat és egyéb részecskéket apró téridő-alagutak formájában írták le.^[638] 1955-ben a fizikus John Wheeler a történelemben először „féregjáratoknak” nevezte el ezeket az alagutakat.^[639] A féregjáratokról készített elemzése teljességgel összeegyeztethetőnek mutatta a jelenséget az általános relativitáselmélettel, amely a teret egy másik dimenzióban lényegében görbültnek írja le.

1988-ban a Kaliforniai Műszaki Egyetem fizikusai, Michael Morris, Kip Thorne és Uri Yurtsever részletesen megmagyarázták, hogyan tudnánk ilyen féregjáratokat tervezni.^[640] Carl Sagan kérdésére válaszolva leírták a különböző méretű féregjáratok nyitva tartásához szükséges energiakövetelményeket. Azt is hangsúlyozták, hogy a kvantumfluktuáció alapján az úgynevezett üres tér folyamatosan apró, szubatomi méretű féregjáratokat hoz létre. Energia hozzáadásával – megfelelően mind a kvantumfizika, mind az általános relativitás követelményeinek (noha e két területet híresen nehéz összeegyeztetni) – ki lehetne tágítani ezeket a féregjáratokat, hogy szubatomi részecskéknél nagyobb tárgyak is utazhassanak bennük. Embereket sem lenne lehetetlen utaztatni ily módon, habár a végletekig bonyolult volna. Ám, mint már fentebb rámutattam, valójában csak nanobotokat és információt kellene útnak indítanunk, amelyekátférhetnek a mikronokban, és nem méterekben mérhető féregjáratokon.

Thorne és PhD-hallgatói, Morris és Yurtsever, egy módszert is kidolgoztak az általános relativitás és a kvantummechanika alapján, amely féregjáratokat létesítene a Föld és távoli helyszínek között. Javaslatuk a spontán módon kialakult, szubatomi féregjárat energia hozzáadásával való kitágításából áll, majd annak stabilizálásából, a két összekapcsolódó „féregjárat nyílásába” helyezett szupravezető gömbök segítségével. Miután a féregjárat kitágult és stabilizálódott, egyik nyílását egy másik helyre kell szállítani, miközben a Földön maradt másik nyílással való kapcsolatának megtartására kell

törekedni.

Thorne példájában a távolabbi nyílást egy kis rakétával a Vega csillagra viszik, amely huszonöt fényévnnyire van a Földtől. A fénysebességhez nagyon közeli sebességnél az út viszonylag rövid az űrhajón lévő órák tanúsága szerint. Például, ha a hajó a fénysebesség 99,995%-ával repül, a hajón lévő órák csak három hónapot haladnak előre. Bár az utazás ideje a Földön mérve körülbelül huszonöt év volna, a kinyújtott féregjárat megőrizné a helyszínek, valamint a helyszínek időpillanatainak közvetlen kapcsolatát. Így még a Földön is csak három hónapba kerülne a kapcsolatfelvétel a Föld és a Vega között, mert a féregjárat két vége megtartaná a közöttük lévő időviszonyt.

Megfelelő mérnöki fejlesztések lehetővé tehetnék ilyen kapcsolatok létrehozását bármerre az univerzumban. A fénysebességhez közeli tetszőleges sebességen utazva a kapcsolat létrehozásához szükséges idő – úgy a kommunikáció, mint a szállítás terén – relatíve rövid lehetne még több millió vagy milliárd fényévre található helyszínek esetén is.

Matt Visser, a St. Louis-i Washington Egyetemről, finomított a Morris–Thorne–Yurtsever-modellen. Elképzelése stabilabb környezetet biztosít, amely még emberek számára is lehetővé teheti az utazást a féregjáratokban.^[641] Véleményem szerint azonban erre semmi szükség. Mire az ilyen mérvű mérnöki projektek megvalósíthatóak lesznek, az emberi intelligenciát már régen nem biológiai összetevője uralja majd. Elegendő, és egyszerűbb is lesz molekuláris méretű önsokszorosító eszközöket útnak indítani, szoftverrel a memóriájukban. Anders Sandberg úgy becsüli, egy-egy nanométeres féregjárat hihetetlen módon 10^{69} bitet lenne képes továbbítani másodpercenként.^[642]

A fizikus David Hochberg és a Vanderbilt Egyetem professzora, Thomas Kephart hangsúlyozzák, hogy nem sokkal az ősrobbanást követően a gravitáció elég erős volt ahhoz, hogy nagyszámú önstabilizáló féregjárat spontán létrehozásához szükséges energia szabaduljon fel.^[643] Ezeknek a féregjáratoknak egy jelentős része valószínűleg még mindig létezik és talán átjárható, egy az univerzum különböző pontjait összekötő, roppant folyosóhálózatot alkot. Talán könnyebb volna ezeket a természetes féregjáratokat felfedezni és felhasználni, mint újakat létrehozni.

A fénysebesség megváltoztatása. A második feltételezés az, hogy magát a fény sebességét is meg lehet változtatni. A harmadik fejezetben említést tettem a kutatási eredményről, amely arra enged következtetni, hogy a fénysebesség az elmúlt kétmilliárd évben értékének 4,5-ször százmilliomod részével megváltozott.

2001-ben a csillagász John Webb hatvannyolc kvazár (nagyon fényes, fiatal galaxis) fényét megvizsgálva felfedezte, hogy az úgynevezett finomszerkezeti állandó változik.^[644] A fénysebesség a finomszerkezeti állandóban szereplő négy konstans egyike, így az eredmény egy újabb feltételezés, miszerint az univerzumban uralkodó változó feltételek megváltoztathatják a fény sebességét. A Cambridge-i Egyetem fizikusa, John Barrow és kollégái jelenleg egy kétéves asztali kísérletet végeznek a fény sebességének kismértékű, technológiai úton történő megváltoztatására.^[645]

A feltevések, miszerint a fény sebessége változhat, egybevágnak mai elméleteinkkel, amelyek a fénysebesség jelentősen magasabb értékét tételezik fel az univerzum felfűvódó szakaszában (a világegyetem történetének korai szakaszában, amikor rendkívül gyors táguláson ment keresztül). A fénysebesség lehetséges megváltoztatását célzó kísérletek még megerősítésre várnak, és esetünkben eleve csupán kis változásról lenne szó. Ám ha a gyanú beigazolódik, az drasztikus hatással jár majd, hiszen akkor már csupán a mérnöki tudomány feladata, hogy egy alig észrevehető hatást nagyban felerősítsen. Még egyszer: a jelenleg elvégzendő gondolkísérlet nem az, hogy vajon

korunk emberi tudósai, akik hozzánk hasonlóak, képesek-e kivitelezni ezeket a műszaki bravúrokat, hanem hogy egy intelligenciáját több billiószor billiónyira tágitott emberi civilizáció képes lesz-e erre.

Egyelőre annyit mondhatunk, hogy az intelligencia ultramagas szintjei a fény sebességével fognak kifelé terjedni, miközben tudomásul vesszük, hogy mai fizikai tudásunk azt sugallja, a terjedés valós sebességhatára nem ez, vagy hogy amennyiben a fénysebesség megváltoztathatatlanak bizonyul, ezt a határt talán átléphetjük fűregjáratok használatával, amelyeken keresztül sebesen más helyszínekre utazhatunk.

Újra a Fermi-paradoxonról. Talán még emlékszünk rá, hogy a biológiai evolúciót több millió és milliárd évben mérjük. Tehát ha léteznek odakinn a világűrben más civilizációk, fejlettségi szintjük nagy időmennyiségekkel eltérhet egymástól. A SETI feltételezése szerint több milliárd ETI-nek kell lennie (a megannyi galaxisban), így tehát több milliárd olyan van, amely nálunk sokkal előrébb jár a technológiai fejlődésben. Eközben persze mindössze legfeljebb néhány évszázad kell ahhoz, hogy ezek a civilizációk a számítástechnika megjelenésétől legalábbis fénysebességgel terjeszkedni kezdjenek kifelé. Ha ez így van, miként lehetséges mégis, hogy eddig nem vettük észre őket? Az én következtetésem szerint az látszik valószínűnek (bár nem bizonyosnak), hogy nincsenek ilyen más civilizációk.

Más szóval mi vezetünk. Úgy bizony: egyszerű civilizációnk a kisteherautóival, a gyorsételeivel és az állandó konfliktusaival (valamint számítástechnikájával!) vezet az univerzum komplexitásának és rendjének létrehozásában. Ez meg hogyan lehetséges? Nem túl valószínűtlen ez a valószínűleg lakott bolygók roppant számát tekintve? De bizony, hogy az. Ám az univerzumunk létezése is éppen ennyire valószínűtlen az adott fizikai törvényeivel és vonatkozó fizikai állandóival, amelyek egyébként elengedhetetlenek az élet kifejlődése szempontjából. De az antropikus elv alapján, ha a világegyetem nem tenné lehetővé az élet megjelenését, nem volnánk itt, hogy ezt megfigyeljük. És mégis itt vagyunk. Így hát egy hasonló antropikus elvnek megfelelően vezető pozícióban vagyunk az univerzumban. Megint csak: ha nem volnánk itt, nem tudnánk erről.

Lássunk néhány érvet a fenti nézőpont ellenében!

Talán léteznek rendkívül fejlett civilizációk valahol a világűrben, de kívül esünk intelligenciájuk fénygömbjén. Azaz még nem értek ide. Na jó, ebben az esetben a SETI sem találja meg az ETI-ket, hiszen nem fogjuk látni (vagy hallani) őket, legalábbis addig nem, amíg nem tudunk valamiképpen kitörni a saját fénygömbünkől (vagy az ETI az övéből) a fénysebesség manipulálásával vagy rövidebb utak keresésével.

Talán már köztünk vannak, de úgy döntöttek, hogy a számunkra láthatatlanok maradnak. Ha így határoztak, valószínűleg sikerül nekik észrevétlennek maradniuk. Megint csak nehéz elhinni, hogy minden egyes ETI ugyanarra a döntésre jutott volna.

John Smart „felemelkedési” forgatókönyvében eljátszik a gondolattal, hogy ha egyszer a civilizációk megtöltik intelligenciájukkal az űr hozzájuk tartozó szeletét, létrehoznak egy új univerzumot (egy olyat, ami lehetővé teszi a komplexitás és intelligencia folytonos, exponenciális növekedését), és lényegében elhagyják ezt a világegyetemet.^[646] Smart szerint ez a lehetőség olyan vonzó, hogy az ETI fejlődésének nem is lehet egyéb végkimenetele, és ezért megmagyarázza a Fermi-paradoxont.

Ami azt illeti, soha nem tartottam valószínűnek azt, hogy – akár a tudományos-fantasztikus történetekben – nagydarab, puha lények vezérlik hatalmas űrhajóikat a világunk felé. Seth

Shostak megfogalmazása szerint „az egyetlen ésszerű lehetőség az, hogy ha találkozunk valaha földön kívüli intelligenciával, az gépi intelligencia lesz, nem hozzánk hasonló biológiai életforma”. Nézetem szerint ez nem egyszerűen arról szól, hogy a biológiai lények gépeket indítanak útnak (mint ahogy mi ma tesszük), hanem hogy egy hozzánk eljutni képes fejlett civilizációnak már régen össze kellett olvadnia a technológiájával, és nincsen szüksége fizikai organizmusokra vagy felszerelésre.

Ha léteznek, miért jönnének ide? Az egyik küldetés talán megfigyelés lenne – információgyűjtés (ahogyan mi is megfigyeljük ma a Földön élő többi fajt). Egy másik magyarázat az anyag- és energiagyűjtés, amellyel további szubsztrátumot biztosítanak a táguló intelligenciának. A felderítéshez és terjeszkedéshez szükséges intelligencia és felszerelés (az ETI részéről vagy általunk, amikor arra a fejlettségi szintre érünk) rendkívül kis méretű volna, alapjában véve csak nanobotok sokasága és információátvitel.

Úgy tűnik, a naprendszerünket még senki sem változtatta a saját maga komputerévé. És ha ez a másik civilizáció csak a tudás kedvéért figyel meg minket, és úgy döntött, hogy hallgat, a SETI sem fog rátalálni, hiszen ha egy fejlett civilizáció nem akarja, hogy megtaláljuk, eléri, amit akar. Ne felejtjük el, hogy egy ilyen civilizáció sokkalta intelligensebb, mint amilyenek mi vagyunk jelenleg. Talán akkor fedi fel magát előttünk, amikor elérjük evolúciónk következő szintjét, amikor összeolvasztjuk biológiai agyunkat a technológiánkkal, tehát a szingularitás után. Ám mivel a SETI feltételezése szerint több milliárd ilyen magasan fejlett civilizáció létezik, nem dönthettek mind úgy, hogy félreállnak.

Újra az antropikus elvről. Az antropikus elv két lehetséges alkalmazását ismerjük: az egyik univerzumunk figyelemre méltó életbarát törvényeivel kapcsolatos, a másik bolygónk tényleges biológiájára vonatkozik.

Vegyük először az univerzumra alkalmazott antropikus elvet részleteiben! Az univerzum kérdése azért vetődik fel, mert látjuk, hogy a természetben jelen lévő állandók pontosan azok, amelyekre szükség van a világegyetem komplexitásának eddigi kialakulásához. Ha a kozmológiai állandó, a Planck-állandó és a többi nagyszámú fizikai állandó értéke csak egy kevéssel is különbözne a jelenlegitől, az atomok, molekulák, csillagok, bolygók, élőlények és emberek nem létezhetnének. Az univerzum, úgy látszik, éppen a megfelelő szabályokkal és konstansokkal dolgozik. (A helyzet emlékeztet Steven Wolfram megfigyelésére, miszerint a sejtautomaták bizonyos szabályai [lásd a második fejezetet] figyelemre méltóan komplex és kiszámíthatatlan mintákat tesznek lehetővé, míg más szabályok jobbára érdektelen mintákhoz vezetnek, mint például váltakozó vonalak, vagy ismétlődő, netán véletlenszerű sorokba rendeződő egyszerű háromszögek.)

Hogyan magyarázzuk tehát az univerzumunkban fellelhető anyag és energia törvényeinek és állandóinak figyelemreméltó természetét, amelyek megteremtették a biológiai és technológiai evolúcióban megtestesülő egyre növekvő komplexitást? Freeman Dyson egyszer azt mondta, hogy „az univerzum bizonyos értelemben tudta, hogy jövünk”. A komplexitáskutató James Gardner a következőképpen írja le a problémát:

„A fizikusok úgy érzik, a fizika feladata megjósolni, mi történik a laborban, és meg vannak győződve róla, hogy a hűrelmélet vagy az M-elmélet képes ebben segíteni... Azonban fogalmuk sincs arról, miért rendelkezik az univerzum egy több mint negyven, épp megfelelő értékű paramétert tartalmazó standard modellel. Hogyan hiheti valaki, hogy ami ennyire kusza, az a hűrelmélet egyedülálló eredménye? Nem is

értem, egyes emberek miként lehetnek ennyire szemellenzősek, hogy csak az univerzum végső állapotára tudnak koncentrálni, és nem kérdezik meg, hogyan és miért alakult így.”^[647]

A zavarba ejtő kérdés, hogy miként lehet a világegyetem olyan „életbarát”, létrehozta az antropikus elv különböző megfogalmazásait. Az antropikus elv „gyenge” változata szerint, ha nem így volna, nem volnánk itt, hogy eltűnjünk rajta. Így tehát csakis egy növekvő komplexitást támogató világegyetemben merülhet fel ez a kérdés egyáltalán. Az antropikus elv erősebb változatai kimondják, hogy az egész mögött több van; az erős változatok szószólói nem elégednek meg a szerencsés egybeesés magyarázatával. Innen már csak egy ugrás az intelligens teremtes híveinek azt állítani, hogy végre megtaláltuk Isten létezésének bizonyítékát, amit a tudósok már régóta keresnek.

A multiverzum. Nemrégiben felmerült az erős antropikus elv sokkal inkább darwini megközelítése. Kezdjük ott, hogy egy matematikai egyenletnek több megoldása is lehet; például x megoldása az $x^2 = 4$ egyenletben lehet 2 vagy -2 . Bizonyos egyenletek végtelen számú megoldást engednek meg. A $(a - b) \times x = 0$ egyenletben az x bármilyen végtelen számú értéket felvehet, ha $a = b$ (hiszen bármely szám nullával való szorzata nulla). Példának okáért, a mai húrelméletek egyenleteinek elvileg végtelen számú megoldása létezik. Pontosabban szólva, mivel az univerzum térbeli és időbeli felbontása a nagyon kicsi Planck-állandóra korlátozódik, a megoldások száma nem szó szerint végtelen, hanem mindössze mérhetetlenül nagy. A húrelmélet azt állítja tehát, hogy nagyon sok különböző természetes állandó lehetséges.

Innen ered a multiverzum gondolata: azaz, hogy nagyszámú univerzum létezik, és apró világegyetemünk csak egy közülük. A húrelméletnek megfelelően minden ilyen univerzumnak különböző fizikai állandói lehetnek.

Evolválódó világegyetek. Leonard Susskind, a húrelmélet megalkotója, valamint Lee Smolin elméleti fizikus és a kvantumgravitáció szakértője felvetették, hogy az univerzumok más univerzumokat szülnek egy természetes evolúciós folyamat során, amely fokozatosan finomítja a természetes állandókat. Más szóval nem véletlen, hogy univerzumunk szabályai és állandói ideálisak az intelligens élet kifejlődéséhez, hanem ilyenné fejlődtek.

Smolin elméletében az új univerzumokat létrehozó mechanizmus a fekete lyukak létrejötte; eszerint amely univerzumok a legjobban tudnak fekete lyukakat létrehozni, azok termelődnek újra a legnagyobb valószínűséggel. Smolin szerint az az univerzum tud nagy valószínűséggel univerzumszülő fekete lyukakat is létrehozni, amely a legjobban képes növekvő komplexitást – azaz biológiai életet – teremteni. „A fekete lyukakon keresztül történő reprodukció – magyarázza –, multiverzumhoz vezet, amelyben az élet feltételei közősek; lényegében azért, mert az élet néhány feltétele, mint például az elegendő mennyiségű szén, az olyan csillagok létrejöttében is szerepet játszik, amelyek elég nagyok és így fekete lyukakká válhatnak.”^[648] Susskind felvetése részleteiben eltér Smolinétól, de szintén a fekete lyukakon, valamint a „felfűvódás” természetén, a korai univerzum gyors tágulását okozó hatáson alapul.

Az intelligencia mint a világegyetem sorsa. A *The Age of Spiritual Machines* (A spirituális gépek kora) című könyvemben egy ezzel kapcsolatos gondolatot mutattam be, nevezetesen azt, hogy az intelligencia végül áthatja az univerzumot és eldönti a kozmosz sorsát:

„Mennyire fontos az intelligencia az univerzum szempontjából? A közgondolkodás szerint nem túlzottan. Csillagok születnek és pusztulnak el; galaxisok mennek át a teremtés és pusztulás körein; az univerzum egy ősrobbanással kezdődött és egy nagy reccsel vagy egy nagy szétszakadással lesz vége, majd kiderül, melyikkel. Ám az intelligenciának ehhez nem sok köze van.

Az intelligencia csak egy kis hab, apró lények kavargása, akiket kikerülhetetlen univerzális erők rángatnak ide-oda. Az univerzum közömbös gépezete egy távoli jövő felé haladva lassan felhúzza vagy leereszti magát, és az intelligencia ezzel szemben semmit sem tehet.

Így véli a közgondolkodás. De én nem értek egyet vele. Feltételezésem szerint az intelligencia végül hatalmasabbnak bizonyul majd, mint ezek a nagy, személytelen erők... A világegyetem vajon nagy reccsel, vagy a halott csillagok végtelen tágulásával, vagy valami egyéb módon ér véget? Szerintem az elsődleges kérdés nem az univerzum tömege, vagy az antigravitáció lehetséges létezése, vagy Einstein úgynevezett kozmológiai állandója. Az univerzum sorsa inkább egy jövőben meghozandó döntésen múlik, amelyet majd akkor veszünk fontolóra, amikor elérkezik az ideje.”^[649]

James Gardner komplexitáskutató az intelligencia univerzális evolúciójára vonatkozó elképzelésemet vegyítette Smolin és Susskind fejlődő univerzum modelljeivel. Gardner úgy véli, hogy főként az intelligens élet evolúciója hozza létre az utóduniverzumokat.^[650] Gardner a brit csillagász Martin Rees megfigyelésére épít, aki szerint „amit mi alapvető állandóknak hívunk – a fizikusok kedvenc számaira gondolva – talán a végső elmélet másodlagos következményei, semmint legmélyebb és legalapvetőbb szintjének közvetlen megnyilvánulási formái”. Smolin merő egybeesésnek látja, hogy a fekete lyukak és a biológiai élet hasonló feltételeket igényelnek (mint például a nagy mennyiségű szén), így feltételezésében semmiféle kitüntetett helyet nem hagy az intelligenciának azon kívül, hogy bizonyos életbarát körülmények mellékterméke. Gardner elképzelésében éppen az intelligens élet teremti meg az utódait.

Gardner azt írja: „mi, emberek és a kozmosz más élőlényei egy nagy, felfedezésre váró transzterresztriális közösség tagjai vagyunk, amelynek életei és intelligenciái több milliárd galaxisban és megszámlálhatatlan fényévnyi távolságokban vannak szétszórva, és akik kollektíven kozmikus fontosságú küldetést teljesítenek. A biokozmosz elképzelésen keresztül azonos a sorsunk ezzel a közösséggel – azaz, hogy segítsünk kialakítani az univerzum jövőjét, és élettelen atomok sokaságából hatalmas, transzcendens elmévé alakítsuk”. Gardner számára a természet törvényei és a pontosan kiegyensúlyozott állandók „a DNS kozmikus megfelelőiként funkcionálnak: ők adják a »receptet«, amellyel fejlődő kozmoszunk megszerzi az élet és a még nagyobb intelligencia létrehozásának képességét”.

Saját nézetem egyezik Gardner abbéli hitével, hogy az intelligencia a legfontosabb jelenség a világegyetemben. Viszont nem értek egyet Gardnerrel abban, hogy egy kiterjedt „transzterresztriális közösség tagjai vagyunk, amelynek életei és intelligenciái több milliárd galaxisban és megszámlálhatatlan fényévnyi távolságokban vannak szétszórva”. Még nem láttuk bizonyítékát, hogy a Földön túl létezhet egy ilyen közösség.

Az egyetlen közösség, ami számít, talán éppen a saját szerény civilizáciánk. Mint már fentebb megmutattam, hiába tudunk mindenféle magyarázatot adni arra, miért nem mutatkoznak az intelligens civilizációk (például elpusztították magukat vagy rejtőzködnek, vagy *minden* kommunikációs

technológiájukat továbbfejlesztették az elektromágneses sugárzáshoz képest és így tovább), nem hihető az, hogy a több milliárdnyi civilizáció (a SETI feltételezésének megfelelően) mindegyike láthatatlan akarna maradni.

A végső hasznossági függvény. Létrehozhatunk egy konceptuális hidat a Susskind és Smolin elméleteiben megjelenő fekete lyukak mint a multiverzum minden univerzumának „hasznossági függvénye” (az evolúciós folyamatban optimalizált tulajdonsága) és a Gardner, valamint általam képviselt intelligenciafelfogás mint hasznossági függvény között. Mint azt a harmadik fejezetben kifejtettem, egy komputer számítástechnikai kapacitása a tömegének és a számítási hatékonyságának a függvénye. Emlékezzünk rá, hogy egy sziklának jelentős súlya van, de rendkívül alacsony számítási hatékonysággal rendelkezik (azaz a részecskéi között történő minden kölcsönhatás effektív véletlenszerűséget mutat)! Az emberi lényekben lévő részecskék kölcsönhatásai ugyanúgy nagyrészt véletlenszerűek, de logaritmikus értelemben az emberek durván félúton járnak a szikla és a legvégső apró számítógép között.

A végső számítógéphez közel álló modellek rendkívül nagy számítási hatékonysággal rendelkeznek. Ha egyszer elérjük az optimális számítási hatékonyságot, csak a tömeg növelésével leszünk képesek fokozni a komputer számítástechnikai kapacitását. Ha elegendő mértékben megnöveljük a tömeget, a gravitációs ereje elég erőssé válik ahhoz, hogy fekete lyukká alakuljon át. Így a fekete lyuk tekinthető a végső komputernek.

Természetesen erre a célra nem felel meg akármilyen hétköznapi fekete lyuk. A legtöbb fekete lyuk a sziklához hasonlóan túl sok véletlenszerű kölcsönhatásban vesz részt, de nem végez hasznos számításokat. Ám egy jól szervezett fekete lyuk lehetne a lehető leghatékonyabb számítógépe a cps per liter értéket tekintve.

A Hawking-sugárzás. Régóta folyik vita arról, hogy képesek vagyunk-e információt sugározni egy fekete lyukba, ott valami hasznosat kezdeni vele, majd újra hozzáférni. Stephen Hawking elképzelése a fekete lyukakból nyert üzenetekről az eseményhorizonthoz (a fekete lyuk legvégső pereméhez, amelyen túlról az anyag és energia már nem tud elszökni) közel létrehozott részecske-antirészecske párokon alapul. Amikor ez a spontán folyamat megtörténik – ahogy a tér bármely más pontján szokott –, a létrejövő részecske és antirészecske ellenkező irányban halad. Ha az egyik az eseményhorizont felé tart (hogy aztán végérvényesen eltűnjön), a másik távolodni fog a fekete lyuktól.

Utóbbiak egy része elegendő energiával rendelkezik ahhoz, hogy kiszabaduljon a fekete lyuk gravitációs hatása alól – ezek alkotják a Hawking-sugárzást.^[651] Hawking elemzése előtt azt hittük, a fekete lyukak, nos, hát, feketék, ám afelfedezése segítségével rájöttünk, hogy valójában folyamatosan részecskék távoznak belőlük. Azonban Hawking szerint ez a sugárzás véletlenszerű, hiszen az eseményhorizonthoz közel eső véletlenszerű kvantumeseeményekből ered. Eszerint, bár egy fekete lyuk tartalmazhat egy végső számítógépet, Hawking eredeti elképzeléséből következően hasznos információ nem szabadul ki a fekete lyukból, így hát ez a komputer soha nem lesz képes közölni a számítási eredményeit.

1997-ben Hawking és fizikustársa, Kip Thorne (a fűregjék kutatója) fogadást kötött a Kaliforniai Műszaki Egyetemen dolgozó John Preskill-lel. Hawking és Thorne kijelentették, hogy a fekete lyukba belépő információ elvesz, és a fekete lyukban történő bármilyen számítás, legyen az hasznos vagy haszontalan, soha nem sugározható ki a lyukból, míg Preskill azt állította, hogy az információ begyűjthető.^[652] A vesztesnek enciklopédia formájában kell átadnia a győztes számára

valami hasznos információt.

A köztes években a fizikustársadalom konszenzusa kissé eltávolodott Hawking elképzelésétől, és 2004. július 21-én Hawking elfogadta, hogy veszített és hogy Preskillnek igaza volt: a fekete lyukba küldött információ nem vesz el. Átalakítható a fekete lyukon belül és aztán kisugározható belőle. Az elképzelés szerint az történik, hogy a fekete lyuktól távolodó részecske kvantum-összefonódásban marad a fekete lyukban eltűnő antirészecskéjével. Ha a fekete lyukban lévő antirészecske hasznos számításban vesz részt, ezeket az eredményeket a fekete lyukon kívül eső, összefonódott párja az állapotában kódolja.

Ennek megfelelően Hawking elküldött Preskillnek egy enciklopédiát a krikettjátékról, ám Preskill visszautasította, és baseball-enciklopédiához ragaszkodott, amelyet egy ünnepélyes bemutató keretében Hawking szintén elküldött Kaliforniába.

Ha azt feltételezzük, hogy Hawking új álláspontja tényleg helyes, a végső számítógépek fekete lyukak lennének. Így hát egy jól megtervezett univerzum, amely képes fekete lyukakat létrehozni, egyben arra is képes, hogy optimalizálja az intelligenciáját. Susskind és Smolin mindössze azt mondták ki, hogy a biológiai élet és a fekete lyukak ugyanazokat az anyagokat igénylik, és így a fekete lyukakra optimalizált világegyetem a biológiai élet kialakítására is alkalmas. Annak felismerésével azonban, hogy a fekete lyukak az intelligens számítástechnika legvégső tárházai, kijelenthetjük, hogy a feketelyuk-teremtés hasznossági függvénye és az intelligencia optimalizálásának hasznossági függvénye egy és ugyanaz.

Miért hatalmasabb az intelligencia a fizikánál? Van másik oka is az antropikus elv alkalmazásának. Talán rendkívül valószínűtlennek tűnik, hogy a bolygónk vezető helyzetben van a technológiai fejlettség tekintetében, ám mint már korábban kifejtettem, a gyenge antropikus elv szerint, ha nem fejlődtünk volna ki, nem volnánk itt, hogy megtárgyaljuk a kérdést.

Amint az intelligencia magába olvasztja a számára elérhető anyagot és energiát, az ostoba anyagot intelligens anyaggá formálja. Bár az intelligens anyag névlegesen még mindig a fizika logikájának engedelmeskedik, olyan rendkívüli módon intelligens, hogy képes a törvények legrejtettebb aspektusait felhasználni, hogy kedvére alakítsa az anyagot és energiát. Tehát legalábbis úgy tűnik, az intelligencia hatalmasabb a fizikánál. Valójában úgy értem, hogy az intelligencia hatalmasabb a kozmológiánál. Azaz mihelyt az anyag intelligens anyaggá válik (teljesen átítatódik intelligens folyamatokkal), képes úgy manipulálni a többi anyagot és energiát, ahogy az neki tetszik (megfelelően kompetens műszaki megoldások révén). A jövő kozmológiájából általában kihagyják ezt a perspektívát. Feltételezzük, hogy az intelligenciának semmi köze a kozmológiai eseményekhez és folyamatokhoz.

Ha egy bolygó egyszer technológiateremtő fajt hoz létre, és az a faj megteremti a számítástechnikát (ahogyan nálunk is történt), csak néhány évszázad kérdése, hogy intelligenciája áthassa a környezetében található anyagot és energiát, és legalábbis a fény sebességével elkezdjen kifelé terjeszkedni (bár valószínűnek tűnik, hogy ez a határ megkerülhető). Egy ilyen civilizáció legyőzheti a gravitációt (páratlan és mérhetetlen technológiája révén) és egyéb kozmológiai erőket – vagy, pontosabban fogalmazva, irányítani tudja majd ezeket az erőket –, és olyan univerzumot tervezhet magának, amelyet csak akar. Ez a szingularitás célja.

Világegyetem léptékű számítógép. Mennyi időbe telik civilizációnknak mérhetetlenül kitágult intelligenciánkkal áthatni az univerzumot? Seth Lloyd úgy becsüli, a világegyetemben körülbelül

10^{80} részecske található, amelyek elméleti maximális kapacitása körülbelül 10^{90} cps. Más szóval egy univerzum nagyságú komputer 10^{90} cps-en lenne képes számolni.¹⁶⁵³¹ Lloyd először is az anyag megfigyelt sűrűségét vette – ami körülbelül egy hidrogénatom köbméterenként –, és ebből a számból kiszámolta a világegyetemben található teljes energiát. Ezt a számot a Planck-állandóval osztva körülbelül 10^{90} cps-t kapott. Az univerzum körülbelül 10^{17} másodperc korú, tehát eddig kerekítve legfeljebb körülbelül 10^{107} számítás történhetett benne. Minden részecske körülbelül 10^{10} bitet képes tárolni az összes szabadsági fokában (hely, sebesség, spin stb.), tehát az univerzum állapota időpillanatonként körülbelül 10^{90} bit információt képvisel.

Nem kell azonban az univerzum teljes tömegét és energiáját számításra szálni. Ha 0,01%-ot alkalmaznánk, még mindig maradna 99,99% átalakítatlan tömeg és energia, de számítástechnikai potenciálunk körülbelül 10^{86} cps-en állna. Jelenlegi tudásunk alapján csak közelíthetünk ezekhez a nagyságrendekhez. Az ilyen mérvű intelligencia elképzelhetetlen hatalmassága révén képes lesz olyan gondossággal végrehajtani ezeket a műszaki csodákat, hogy ne szakítsa meg a megőrzésre ítélt természeti folyamatokat.

A holografikus világegyetem. A világegyetem maximális információtárolási és feldolgozási kapacitásának egy másik vetülete egy az információ természetéről szóló új, spekulatív elmélet eredménye. A „holografikus univerzum” elmélet szerint a világegyetem valójában az információ kétdimenziós felületre írott elrendezése, így hagyományos háromdimenziós megjelenése pusztán illúzió.¹⁶⁵⁴¹ Az elmélet szerint az univerzum lényegében egy gigantikus hologram.

Maga az információ nagyon apró léptékű, a Planck-állandó jellemzi. Így az univerzumban található információmennyiséget úgy kapjuk, ha annak felületét elosztjuk a Planck-állandó négyzetével, amely körülbelül 10^{120} bitre rúg. Nem hisszük, hogy ennyi információ kódolására alkalmas mennyiségű anyag létezne a világegyetemben, így a holografikus univerzum határértékei talán magasabbak, mint ami valóban elképzelhető. Akárhogy is, a különböző becslések nagyságrendjei és azok számának nagyságrendje ugyanabban a tartományban találhatóak. Egy hasznos számításra átszervezett univerzum által tárolni képes bitek száma 10^{80} és 10^{120} között lehet.

Megint csak kimondhatjuk: műszaki képességeink, még mérhetetlenül fejlett jövőbeli fajunk műszaki képességei is, valószínűleg elmaradnak ezektől a maximumértékektől. A második fejezetben bemutattam, miként fejlődtünk 10^{-5} -ről 10^8 cps per ezer dollár kapacitásra a XX. században. A XX. században látott sima, hatványozottan exponenciális fejlődés folytatására alapozva azt jósoltam, hogy 2100-re elérjük a körülbelül 10^{60} cps per ezer dollár értéket. Amennyiben becslésünkben a számítástechnikára mindössze billió dollárt szánunk, az az évszázad végére összesen körülbelül 10^{69} cps-t eredményez. Ezt a naprendszerünkben fellelhető anyag és energia segítségével érhetjük el.

A 10^{90} cps túlhaladásához szét kell szóródnunk a világegyetem többi részébe. A hatványozottan exponenciális görbe folytatása megmutatja, hogy jóval a XXII. század vége előtt áthathatjuk az univerzumot intelligenciánkkal, feltéve, hogy a fénysebesség nem korlátoz bennünket. A XXII. évszázad végére akkor is elérjük a telítettség állapotát, ha a holografikus univerzum elmélete által sugallt tíz az akár harmincadik hatványon értékkel számolunk.

Ha egyáltalán lehetséges megkerülni a fénysebességhatárt, a Naprendszer méretű intelligencia képes lesz megtervezni és kivitelezni a fennmaradó műszaki megoldásokat. Ha fogadnom kellene, a pénzemet arra a feltételezésre tenném, hogy a fénysebesség megkerülése lehetséges, és hogy a következő néhány évszázadban sikerül is elérnünk ezt. Ám ez mindössze az én találgatásom, hiszen egyelőre nem értjük megfelelően ezeket a kérdéseket ahhoz, hogy határozottabb választ adhassunk

rájuk. Ha a fénysebesség megváltoztathatatlan korlát, és a feregjáratokon keresztül sem lehet rövidebb utakat találni, nem évszázadokba, hanem évmilliárdokba fog telni, hogy megtöltsük intelligenciánkkal az univerzumot, továbbá a saját fénygömbünkbe szorulunk vissza. Akárhogy is, a számítástechnika exponenciális növekedése falba ütközik a XXII. évszázadban (de micsoda falba!).

Ez a hatalmas időbeli különbség – néhány száz év vagy több milliárd év (az univerzum intelligenciával való telítettségéig) – jelzi, miért válik olyan fontossá a fénysebesség megkerülésének kérdése. A XXII. évszázadban ez lesz a civilizációnk megnövekedett intelligenciájának elsődleges elfoglaltsága. Ezért hiszek én abban, hogy ha a feregjáratok és egyéb megoldások elképzelhetőek, mindent megteszünk majd, hogy megtaláljuk és felhasználjuk őket.

Ha egyáltalán lehetséges új univerzumokat létrehozni és kapcsolatot teremteni velük, ez lehetővé tenné egy intelligens civilizációnak, hogy tovább folytassa a terjeszkedését. Gardner nézete szerint egy intelligens civilizáció új univerzumot teremtő hatása az újszülött világegyetem fizikai törvényeinek és állandóinak beállításában rejlik. Ám egy ilyen civilizáció mérhetetlen intelligenciája azt is kifundálhatja, miként tudja a saját intelligenciáját közvetlenebb módon kiterjeszteni az új univerzumra. A gondolat, hogy kiterjeszthetjük az intelligenciánkat a jelenlegi univerzumon túlra, természetesen spekulatív, hiszen a multiverzum-elméletek egyike sem engedi meg az univerzumok közötti kommunikációt az alapvető törvények és állandók továbbadásán kívül.

Még ha az általunk ismert egyetlen univerzumra szorulunk is vissza, az a sorsunk, hogy megtöltsük intelligenciával az anyagát és energiáját. Milyen világegyetem lesz az? Nos, ha türelmesen várunk, megláthatjuk.

MOLLY 2004: *Tehát amikor az univerzum eléri a hatodik korszakot (azt a szintet, amikor az intelligenciánk nem biológiai része szétárad az univerzumban), mit tesz majd?*

CHARLES DARWIN: *Nem vagyok benne biztos, hogy meg tudjuk válaszolni ezt a kérdést. Ahogy ön mondta, olyan, mintha a baktériumok kérdeznék egymást arról, mit fognak tenni az emberek.*

MOLLY 2004: *Tehát ezek a hatodik korszakbeli entitások a biológiai embereket a baktériumhoz hasonlónak fogják tartani?*

GEORGE 2048: *Én nem így gondolok rád.*

MOLLY 2104: *George, te csak ötödik koros vagy, és nem hiszem, hogy ez a válasz a kérdésre.*

CHARLES: *A baktériumokra visszatérve, mit mondanának a baktériumok, ha tudnának beszélni...*

MOLLY 2004: *...és gondolkodni.*

CHARLES: *Igen, azt is. Azt mondanák, hogy az emberek ugyanazokat fogják tenni, amit a baktériumok tesznek – azaz, hogy esznek, kerülnek a veszélyt, és szaporodnak.*

MOLLY 2104: *Ó, de a mi szaporodásunk annyival érdekesebb!*

MOLLY 2004: *Valójában, jövőbeli Molly, csak a szingularitás előtti szaporodásunk érdekes. A ti virtuális szaporodásotok valójában olyan, mint a baktériumoké. A szexnek semmi köze hozzá.*

MOLLY 2104: *Való igaz, hogy leválasztottuk a szexualitást a szaporodásról, de ez nem új a 2004-es emberi civilizáció számára. Mellesleg pedig, a baktériumoktól eltérően meg tudjuk változtatni magunkat.*

MOLLY 2004: *Valójában a változást és az evolúciót is leválasztottátok a szaporodásról.*

MOLLY 2104: *Ez alapvetően 2004-ben is igaz volt.*

MOLLY 2004: *Na jó, jó. De a jegyzékével kapcsolatban, Charles: mi, emberek is műveljük a művészetet és a zenét. Ez tesz a többi állattól különbözővé minket.*

GEORGE 2048: *Pontosan, Molly. Ez az, amiről a szingularitás is szól. A szingularitás a legédesebb zene, a legmélyebb művészet, a legszebb matematika...*

MOLLY 2004: *Értem, tehát a szingularitás művészete és zenéje olyan lesz az én korom zenéjéhez és művészetéhez képest, mint a 2004 körüli zene és művészet a...*

NED LUDD: *...a baktériumok zenéjéhez és művészetéhez.*

MOLLY 2004: *Nos, láttam én már művészi penészmintákat.*

NED: *Igen, de biztos, hogy nem adóztál imádattal előttük.*

MOLLY 2004: *Nem, valójában tisztára töröltem a felületet.*

NED: *Akkor érted, mit akarok mondani.*

MOLLY 2004: *Még mindig azt próbálom elképzelni, mit fog csinálni az univerzum a hatodik korszakban.*

TIMOTHY LEARY: *Az univerzum madárként fog szárnyalni.*

MOLLY 2004: *De miben fog repülni? Hiszen az univerzum maga a mindenség.*

TIMOTHY: *Ez olyan, mintha azt kérdeznénk, milyen hangot ad, ha egy kézzel tapsolunk?*

MOLLY 2004: *Hmmm, tehát a zen mesterek végig a szingularitásról beszéltek.*



A
SZINGULARITÁS
KÖZELEG!

Hetedik fejezet

Ich bin ein Singularitarian

„A leggyakoribb ostobaság mind közül az, ha valaki szenvedélyesen hisz olyasvalamiben, ami bizonyíthatóan hamis.”

(H. L. Mencken)

„Az évszázados tradíciókban gyökerező életfilozófiák hemzsegnek a személyes, szervezeti és társadalmi életre vonatkozó bölcsességektől. Sokan felismerjük ezen hagyományok hiányosságait is. Természetes, hogy hibás következtetésekre jutottak kialakulásuk idején, a tudomány megjelenése előtti korokban. Ugyanakkor az ősi életfilozófiák alig vagy egyáltalán nem használhatók a ma felvetődő, alapvető kérdésekkel kapcsolatban, amikor fejlett technológiák segítségével képesek vagyunk megváltoztatni egyéni és emberi identitásunkat, illetve amikor a gazdasági, kulturális és politikai erők átalakítják a globális viszonyokat.”

(Max More: Principles of Extropy [Az extrópia alapelvei])

„A világnak nincsen szüksége egy újabb kizárólagos, teljességre törő dogmára.”

(Max More: Principles of Extropy [Az extrópia alapelvei])

„Igen, van lelkünk. Ám megannyi apró robotból épül fel.”

(Giulio Giorelli)

„Erkölcsei szempontból a szubsztrátum kérdése lényegtelen, amennyiben nem érinti a működőképességet vagy a tudatot. Erkölcsileg nem számít, hogy az illető egyedet szilícium- vagy biológiai alapú neuronok működtetik (amint az sem számít, hogy valakinek sötét vagy világos bőre van-e). Ugyanezen az alapon, ha elutasítjuk a rasszizmust és fajgyűlöletet, el kell utasítanunk a szénsovinizmust vagy bioizmust is.”

(Nick Bostrom: Ethics for Intelligent Machines: A Proposal, 2001 [Az intelligens gépek etikája: Egy javaslat, 2001])

(Egy javaslat, 2001])

„A filozófusok régóta állítják, hogy gyermekeik sokkal összetettebb világba születtek, mint amilyen elődeiké volt. A gyorsuló változás eme korai és gyakran önkéntelen felismerése adta a nyugati hagyomány utópista, apokaliptikus és világvégeváró látásmódját. Azonban van egy különbség: ma nem csupán a próféták, hanem bizonyos mértékig mindenki érzékeli a fejlődés sebességét.”

(John Smart)

A szingularitáriánus olyan ember, aki megérti, mi a szingularitás, és egész életében annak jelentését kutatja.

Engem már több évtizede ezek a gondolatok foglalkoztatnak. Mondanom sem kell, a folyamatot soha nem lehet befejezettnek tekinteni. Tizenévesként a '60-as években az emberi gondolkodás és a

számítógépes technológia kapcsolatán tűnődtem. A '70-es években a gyorsuló technológiai fejlődést kezdtem tanulmányozni, és első könyvem az 1980-as évek végén írtam a témában. Így hát volt időm eltűnődni a most bekövetkező és egymást erősítő változásoknak a társadalomra – és saját életemre – gyakorolt hatásain.

George Gilder úgy jellemezte tudományos és filozófiai nézeteimet, mint „póthitet azok számára, akik elvesztették bizodalmukat a vallás hagyományos tárgyában”.^[655] Gilder állítása érthető, hiszen legalábbis látszólagos hasonlóságok mutatkoznak a szingularitásvárás és a tradicionális vallások által megfogalmazott jóslatok között. Ám én nem a hagyományos hit alternatíváit keresve jutottam el a nézeteimhez. A technológiai trendek megértésére irányuló kutatásaimnak gyakorlati okai voltak: megkíséreltem időzíteni a felfedezéseimet, és optimális taktikai döntéseket akartam hozni azzal kapcsolatban, mikor indítsam el technikai vállalkozásaimat. Idővel a technológia ilyen jellegű modellezése saját életre kelt, és kidolgoztam a technológiai evolúció elméletét. Innen már csak egy ugrás volt, hogy eltűnjek a mélyreható változásoknak a társadalmi és kulturális intézményekre és a saját életemre gyakorolt hatásain. Így hát annak ellenére, hogy a szingularitáriánus gondolkodásmód nem hit, hanem megértés kérdése, a könyvben tárgyalt tudományos tendenciák végiggondolása elengedhetetlenül új perspektívákat nyit a hagyományos vallások által megfogalmazott kérdések terén is, azaz a halál és halhatatlanság természetéről, életünk céljáról, és a világegyetemben található intelligens életről folytatott gondolkodásban.

A szingularitáriánus filozófia sokszor kárhoztat magányra, mert a legtöbb ember, akivel a sors összehoz, nem osztja a nézeteimet. A legtöbb „nagy gondolkodót” teljességgel hidegen hagyják ezek a nagy gondolatok. Az emberek kijelentéseiből és elejtett megjegyzéseiből arra következtethetünk, hogy általában egyetértenek egy egyszerű bölcsességgel: az emberi élet rövid, fizikai és intellektuális lehetőségeink korlátozottak, és életünkben alapvetően semmi sem változik. Erős a gyanúm, hogy amint a változások gyorsuló üteme mind nyilvánvalóbbá válik az emberek számára, ez a szűk horizont egyre inkább kitágul. Mégis, többek között azért írtam meg ezt a könyvet, hogy minél több emberrel megoszthassam a nézeteimet.

Mit is értsünk tehát szingularitás alatt? Akár a Napra, közvetlenül nem tekinthetünk rá – jobb, ha a szemünk sarkából figyeljük meg ezt a mindent átalakító változást. Amint azt Max More állítja, nincs szükségünk sem új dogmára, sem valami újabb szektára, így hát a szingularitárianizmus nem hiedelmek vagy egyesített nézőpontok rendszere. Az igaz, hogy főként a legfontosabb technológiai tendenciák megértésén alapul, ám ugyanakkor olyan látásmódot kölcsönöz, amelynek tükrében mindent újragondolunk, az egészség és a jólét természetétől a halál és az én mibenlétéig.

Számomra a szingularitáriánus gondolkodásmód sokrétű jelentéssel bír; az itt következő példák semmiképpen nem adnak teljes képet róla. Továbbá ezek az elmélkedések a személyes filozófiámat mutatják be, és nem valamiféle új doktrínát hirdetnek.

- Most megvan rá a lehetőségünk, hogy olyan hosszú ideig éljünk, miáltal elérhetjük az örök életet.^[656] A mai tudásunk alapján elvégzett agresszív beavatkozásokkal olyan drasztikus módon lelassíthatjuk az öregedési folyamatainkat, hogy még akkor is erőnk teljében leszünk, amikor a biotechnológia és nanotechnológia radikálisabb életmeghosszabbítási terápiákat tesz lehetővé. Csakhogy a második világháború utáni nemzedékek tagjainak többsége nem fog addig élni, mert nincsenek tisztában a testükben lezajló gyorsuló öregedési folyamatokkal és a beavatkozás lehetőségeivel.
- Ebben a szellemben agresszíven újraprogramozom a biokémiai folyamataimat, amelyek már most is merőben különböznek attól, amilyenek egyébként lennének.^[657] A táplálékkiegészítők és gyógyszerek szedése nem egyféle utolsó mentsvár arra az esetre, ha

valami baj történne. A baj már megtörtént. Testünket egy letűnt korban kifejlődött, elavult genetikai program irányítja, ezért felül kell kerekednünk genetikai örökségünkön. Már rendelkezünk az ehhez szükséges tudással, és én elköteleztem magam e tudás alkalmazása mellett.

- A testem átmeneti test. Részecskéi havonta szinte teljesen átalakulnak. Csak a testem és az agyam mintái folytonosak.
- Arra kell törekednünk, hogy továbbfejlesszük ezeket a mintákat testünk egészségének optimalizálásával és tudatunk kiterjesztésével. Végül az általunk létrehozott technológiával összeolvadva képesek leszünk addig soha nem látott mértékben kiterjeszteni a mentális képességeinket.
- Szükségünk van testre, ám ha egyszer beépítjük a testünkbe a molekuláris nanotechnológia által kínált lehetőségeket, képessé válunk arra, hogy akaratumk szerint megváltoztassuk a fizikai felépítésünket.
- Csak a technológia tudja a lehetőségek olyan léptékét nyújtani, amellyel leküzdhetjük az emberiség útját elálló évszázados akadályokat. Például a most születő technológiák segítségével tiszta és megújuló energiát tudunk majd termelni és tárolni, eltávolíthatjuk a testünkől és környezetünkől a mérgeket és kórokozókat, továbbá meggyarapodott tudásunkkal és anyagi javainkkal véget vethetünk az éhezésnek, illetve a és szegénységnek.
- A tudás minden formája értékes: a zene, a művészet, a tudomány és a technológia éppúgy, mint a testünkbe és agyunkba ágyazódott tudás. Bármelyikük elvesztése tragikus következményekkel jár.
- Az információ nem azonos a tudással. A világot elárasztja az információ; intelligencia kérdése megtalálni és kihasználni a belőle kiemelkedő mintákat. Például érzékeink másodpercenként több száz megabitnyi információt dolgoznak fel, aminek nagy részét intelligenciánk révén elvetjük. Csak a leglényegesebb felismeréseket és észrevételeket tartjuk meg (amelyek mind a tudás különböző formái). Az intelligencia tehát az információ szelektív pusztításával állítja elő a tudást.
- A halál tragédia. Nem lealacsonyító az, amikor egy személyt komplex mintaként (szintén a tudás egy formájaként) értelmezünk, amely a személy halálakor elvész. Legalábbis ma ez a helyzet, hiszen még nem vagyunk képesek hozzáférni ehhez a tudáshoz és biztonsági másolatot készíteni róla. Szó szerint kell érteni, amikor az emberek azt mondják, egy szerettük halálakor saját énjük egy részét veszítik el: ilyenkor az ember elveszíti annak a lehetőségét, hogy hatékonyan használja agya bizonyos idegi mintáit, amelyek az elveszített személlyel való interakcióra önszerveződtek.
- A tradicionális vallások egyik elsődleges szerepe egyfajta halálközpontú racionalizálás, azaz a halál tragédiájának valamiféle jó eseményként való magyarázása. Malcolm Muggeridge is hangoztatja azt a sokak által elfogadott nézetet, miszerint „ha nem volna halál, az életet elviselhetetlennek éreznék”. Ám a művészet, tudomány és egyéb tudásformák szingularitás utáni robbanásszerű gyarapodása több mint elviselhetővé teszi majd az életet: valódi jelentést kölcsönöz majd neki.
- Értelmezésem szerint az élet – az életünk – célja az, hogy egyre gyarapodó tudást hozzunk létre és élvezzük azt, valamint, hogy az egyre növekvő „rend” felé haladjunk. Amint azt a második fejezetben is kifejtettem, az egyre növekvő rend általában egyre növekvő komplexitást feltételez, ám olykor egy mélyreható gondolat a komplexitás csökkentésével éri el a rend növelését.

- Nézetem szerint az univerzum célja tükrözi az életünk célját, azaz a magasabb intelligenciára és nagyobb tudásra való törekvést. Emberi értelmünk és technológiánk végzi eme intelligencia szélesítését (mivel nem ismerünk földön kívüli versenytársakat).
- Amikor még ebben az évszázadban elérjük a fordulópontot, készen állunk majd arra, hogy önmásoló nem biológiai intelligencia útján elárasszuk a naprendszerünket ezzel az egyre táguló intelligenciával. Aztán az továbbterjed az univerzum más részeibe.
- A gondolatok az intelligencia megtestesülései és termékei. A gondolatok azért léteznek, hogy minél több elénk tornyosuló problémát megoldhassunk. Elsősorban azokat a problémákat nem vagyunk képesek megoldani, amelyeket nem tudunk megfogalmazni, és ezek legnagyobbbrészt olyanok, amelyeknek nem vagyunk tudatában. A felmerülő problémák esetén a legalapvetőbb kihívás az, miként tudjuk szavakba (vagy esetenként egyenletekbe) önteni azokat. Ha ezt megoldjuk, képesek vagyunk megtalálni a problémával ütköztethető és a problémát megoldó gondolatokat.
- Hatalmas eszközelőnyt élvezünk a technológia felgyorsult fejlődése révén. Jó példa erre a radikális életmeghosszabbítás oly módon, hogy „hidat építünk egy újabb hídhoz, majd egy következőhöz”, és így tovább (magyarán szólva a mai tudásunk alkalmazásával hidat képezünk a biotechnológiához, amely ugyanakkor hidat épít majd a nanotechnológia korához).^[658] Ezzel pedig megalapozzuk, hogy akár végtelen hosszú ideig éljünk, annak ellenére, hogy ma még nem áll rendelkezésünkre a radikális életmeghosszabbításhoz szükséges tudás. Más szóval nem kell minden problémát ma megoldanunk. Megjósolhatjuk erre alkalmas technológiák elérkezését öt, tíz, vagy húsz éven belül, és már ma beépíthetjük ezeket terveinkbe. Én így tervezem a technológiai projektjeimet, és ez egyaránt lehetséges a társadalom nagy problémái, valamint a saját életünkben jelentkező kérdések megválaszolásakor is.

A kortárs filozófus Max More abban látja az emberiség célját, hogy elérje a transzcendenciát „az emberi értékek által vezérelt tudomány és technológia által”. More Nietzschét idézi: „Az ember kötél, amely állat és emberfölötti ember közé feszített – kötél mélységes mélység fölött.”^[659] Nietzsche metaforáját úgy is értelmezhetjük, hogy miközben az emberiség azt keresi, miként válhatna valami nagyobbá, meghaladja az állatok szintjét. Nietzsche szakadéka talán a technikában rejlő veszélyeket jelenti, amelyekről a következő fejezetben ejtek szót.

More ugyanakkor félelmeinek adott hangot, mondván, hogy „a szingularitásvárás eltereli a figyelmet a jelenkor kérdéseiről”.^[660] Mivel a szingularitás az öregedés problémáinak megoldását ígéri, előfordulhat, hogy az emberek eltávolodnak az evilági, mai problémáktól. Magam is osztom More ellenérzését a „passzív szingularitáriánizmussal” szemben. A cselekvő álláspont azért elengedhetetlen, mert a technológia kétélű kard, és így drasztikus következményekkel járhat, ha a fejlődése rossz irányt vesz a szingularitás felé való hömpölygésében. A legkisebb késlekedés a most születő technológiák alkalmazásában több millió embert kárhozthat további szenvedésre és halálra. Egy példa a sok közül: a törvényhozás túlzott késlekedése az életmentő gyógymódok bevezetésével kapcsolatban, ami megannyi emberéletbe kerül. (A világon évente több millió embert veszítünk el csak szívbetegségek miatt.) More továbbá azt is felveti, hogy „a »hübrisz« és »az ismeretlen« ellenében a »stabilitást« és »békét« célzó vallási és kulturális késztetések» is könnyedén kisiklathatják a gyorsuló technológiai fejlődést.”^[661] Én nem tartom valószínűnek, hogy a technológia általános gyorsulását végérvényesen le lehetne állítani. Még a korszakhatárokat jelző események, például a két világháború (amelyek során mintegy százmillió ember vesztette életét), a hidegháború

és számos egyéb gazdasági, kulturális és társadalmi zavargás sem volt képes a legkisebb mértékben sem lelassítani a technológiai trendek tempóját. Ám a ma egyre gyakrabban hallatott reakciók, zsigerből technológiaellenes érzületek sok szenvedést okozhatnak még.

Még emberi? Egyes megfigyelők a „poszthumán” szóval illetik a szingularitást követő időszakot, és a poszthumanizmus szóval utalnak az ezt előrejelző gondolkodásra. Azonban számomra embernek lenni annyit tesz, hogy olyan civilizáció tagjai vagyunk, amely folyamatosan a határait feszegeti. Már jelenleg is meghaladjuk a biológiai felépítésünket azzal, hogy egyre több eszközünk van testünk átprogramozására és felerősítésére. Ha a technológia által megváltoztatott embert már nem tekintjük embernek, hol húzhatjuk meg a határvonalat? Egy bionikus szívvel rendelkező ember még embernek számít? És egy neurológiai implantátumot hordozó egyén? És ha kettő is van neki? Na és egy olyan személy, akinek körülbelül tíz nanobot lakik az agyában? Vagy akár ötszázmillió nanobot? Meghúzhatjuk a határt mondjuk hatszázötvenmillió nanobotnál? Az alatt még emberek vagyunk, fölötté pedig poszthumánok?

Fokozatos összeolvadásunk a technológiával ingoványos talajra vezérel bennünket, de nézetem szerint a csúszós hegyoldalon feljebb található nagy ígéretek, nem pedig Nietzsche szakadéka felé. Számos gondolkodó egy új „faj” létrehozásáról beszél, ám a faj gondolata biológiai eredetű, és mi éppen afelé haladunk, hogy túllépjük a biológiát. A szingularitásban rejlő változás nem csupán egy a biológiai evolúciós lépések hosszú sorában. Segítségével egyszer s mindenkorra a feje tetejére állíthatjuk az evolúciót.

BILL GATES: *99%-ig egyetértek. Az tetszik a gondolataidban, hogy a tudományon alapulnak, de optimizmusod már-már vallásos jellegű. Én is bizakodó vagyok a jövővel kapcsolatban.*

RAY: *Nos, hát igen: szükségünk van egy új vallásra. A vallás alapvető szerepe mindig is abban állt, hogy megmagyarázza a halált, hiszen egészen mostanáig a vallásos magyarázatokon kívül kevés okosat tudtunk mondani róla.*

BILL: *És mik lennének az új vallás alapelvei?*

RAY: *Két alapelvet vennénk át: az egyiket a hagyományos vallásokból, a másikat a világi bölcsészet- és természettudományból. A hagyományos vallásokból az emberi tudat tiszteletét.*

BILL: *Vagy úgy, az arany szabályt!*

RAY: *Így van: erkölcsi és jogi rendszerünk a mások tudatának tiszteletén alapul. Ha bántok egy másik embert, az azért erkölcstelen és valószínűleg illegális is, mert szenvedést okoztam egy másik tudatos lénynek. Ha tönkreteszek egy vagyontárgyat, nincsen belőle gond akkor, ha a saját tulajdonom volt, ám ha valaki más vagyonához tartozik, tettem elsősorban éppen azért erkölcstelen és illegális, mert nem a vagyontárgynak okoztam szenvedést, hanem a tulajdonosának.*

BILL: *És mi volna a világi alapelv?*

RAY: *A bölcsészet- és természettudományból átvett alapelv a tudás fontossága. A tudás több mint információ. Olyan információ, ami jelentéssel bír a tudattal rendelkező egyének számára: zene, művészet, irodalom, tudomány, technika. Ezek azok a tulajdonságok, amelyek az általam tárgyalt trendekből következően kibővülnek.*

BILL: *El kell szakadnunk a mai vallások túldíszített és furcsa történeteitől, és az egyszerű üzenetek felé kell fordítanunk a figyelmünket. Kell egy karizmatikus vezető az új vallás élére.*

RAY: *A karizmatikus vezetők a régi modell elemei. Ezt is magunk mögött akarjuk hagyni.*

BILL: *Jó, akkor legyen egy karizmatikus számítógép!*

RAY: *Vagy inkább egy karizmatikus operációs rendszer.*

BILL: *Na, az már megvan. Aztán lesz-e Isten ebben az új vallásban?*

RAY: *Egyelőre nem, de később megszületik. Ha sikerül az univerzum anyagát és energiáját átítatni intelligenciával, az „felébred”, tehát tudatára ébred és magasztos intelligenciával fog rendelkezni. Ennél jobb Istent nem is tudok elképzelni.*

BILL: *Te szilíciumalapú, nem pedig biológiai intelligenciáról beszélsz.*

RAY: *Hát igen, addigra meghaladjuk a biológiai intelligenciát. Először összeolvadunk vele, de végül intelligenciánk nem biológiai része határozza majd meg a tudatunkat. Mellesleg nem valószínű, hogy szilíciumalapú lesz, inkább valamiféle szénalapú nanocsöves intelligenciaként tudom elképzelni.*

BILL: *Értem – csak azért használtam a szilíciumalapú kifejezést, mert az emberek így rögtön megértik. Mindazonáltal nem gondolom, hogy emberi értelemben vett tudatra kellene itt gondolnunk.*

RAY: *Miért ne? Amennyiben a szükséges részletességig utánzunk mindent, ami az emberi agyban és a testben történik, és egy másik szubsztrátumban létrehozuk ugyanezeket a folyamatokat, majd nagyban kiterjesztjük őket, akkor miért is nem emberi értelemben vett tudatot alkottunk?*

BILL: *Persze, tudatot alkotunk majd. Csak éppen másféle tudatot.*

RAY: *Talán ez az az egy százalék, amiben nem értünk egyet. Miért volna másféle?*

BILL: *Mert a számítógépek teljesen és azonnal össze tudnak olvadni. Tíz komputer – vagy egymillió – egy gyorsabb, nagyobb számítógéppé válhat. Emberként erre nem vagyunk képesek. Mindannyian különálló individualitással rendelkezünk, és ezeket az individuumokat nem lehet összekötni.*

RAY: *Ezek csak a biológiai intelligencia korlátai. A biológiai intelligenciák áthidalhatatlan távolságai hátráltatnak bennünket. A „szilíciumalapú” intelligencia mindkettőre képes. A számítógépeknek nem kell egy helyütt egyesíteni az intelligenciákat és az energiaforrásaikat. Ha úgy kívánják, maradhatnak „individuumok” is. A szilíciumalapú intelligencia mindkettőre képes: egyszerre tud összeolvadni és képes megtartani az egyediségét. Emberként mi is megpróbálunk másokkal összeolvadni, de ilyenén képességünk csak ideig-óráig tart.*

BILL: *Minden értékes dolog mulandó.*

RAY: *Igen, de a helyét átveszi valami, ami még nagyobb értéket képvisel.*

BILL: *Ez igaz; és ezért nem szabad soha abbahagyni az innovációt.*

A tudat nyugtalanító kérdése

„Ha gyár méretűre nagyíthatnánk az agyat és sétát tehetnénk benne, akkor sem találnánk a tudatot.”

(G. W. Leibniz)

„Emlékszik az ember a szerelemre? Olyan, mintha egy pincében akarnánk felidézni a

rózsailatot. Láthatjuk magunk előtt a rózsát, de az illatát nem.”

(Arthur Miller)⁽⁶⁶²⁾

„Amikor az ember legelőször törekszik egyszerű filozófiai gondolatok megformálására, máris beleütközik a kérdésbe, hogy tud-e valamit, hogy vajon tudja-e, hogy tud valamit, illetve, hogy amikor magáról gondolkodik, miről is gondolkodik, és végül, hogy mi végzi a gondolkodást. Amikor a kérdés már jó ideje aggasztja az embert, megtanulja kikerülni és nem erőlteti tovább: a tudatos lény ideáját impliciten különbözőnek érezzük egy tudattalan tárgyétól. Amikor azt mondjuk: egy tudatos lény tud valamit, nemcsak azt állítjuk, hogy tudatában van annak a valaminek, hanem, hogy tudja is, hogy tudja, valamint, hogy tudja, hogy tudja, hogy tudja, és így tovább, a végtelenségig. Felismerjük, hogy a végtelenbe jutunk, de nem egy rossz értelemben vett végtelen regresszióhoz, hiszen csupán az értelmetlen kérdések vesznek a semmibe, a válaszok nem.”

(J. R. Lucas, oxfordi filozófus 1961-es Minds, Machines, and Gödel [Elmék, gépek és Gödel] című esszéjéből)⁽⁶⁶³⁾

„Az álmok valóságosak, amíg tartanak; mondhatunk-e többet az életről?”

(Havelock)

Képesek lesznek a jövő gépei érzelmi és spirituális élmények megtapasztalására? A nem biológiai intelligencia létrehozásának számos forgatókönyvét bemutattam azzal a céllal, hogy példázzam a ma élő, biológiai emberi lények gazdag érzelmi viselkedésének teljes spektrumát. A 2020-as évek második felére befejezzük az emberi agy visszafejtését, amellyel az emberek komplexitását és kifinomultságát elérő, majd meghaladó – érzelmi intelligenciával is rendelkező – nem biológiai rendszereket teremthetünk.

Egy másik forgatókönyv szerint feltölthetnénk egy létező ember mintáit egy megfelelő nem biológiai, gondolkodó szubsztrátumba. A harmadik, talán legérdekesebb forgatókönyv azt jósolja, hogy az emberek fokozatosan, de végérvényesen átalakulnak biológiai lényekből nem biológiai lényekké. Ez már elkezdődött a rokkantságot és betegségeket kiküszöbölő neurális implantátumok megjelenésével. Ezek után az először orvosi és öregedésmegelőző céllal kifejlesztett, véráramba beoltott nanobotok következnek. Később náluk is kifinomultabb nanobotok jelennek meg, amelyek kapcsolatba lépnek biológiai neuronjainkkal, és felerősítik az érzékeinket; virtuális, felerősített valóságot szolgáltatva az idegrendszeren belül, segítve az emlékezetünket és egyéb rutinszerű kognitív feladatokat látva el. Ekkorra már kiborgokká válunk, és erről az idegrendszerünkbe épített ugródeszkről indulva intelligenciánk nem biológiai része exponenciálisan fejleszti majd képességeit. Amint azt a második és harmadik fejezetben tárgyaltam, az információtechnológia minden terén folyamatos, exponenciális növekvés tapasztalható, az ár–teljesítmény-arány javulásában csakúgy, mint a kapacitásban és az új technológiák befogadási sebességében. Mivel az információ megannyi bitjének kiszámításához és kommunikálásához szükséges tömeg és energia rendkívül kicsiny mértékű (lásd a harmadik fejezetet), a fent említett trendek addig folytatódhatnak, amíg nem biológiai intelligenciánk a biológiai rész többszörösére duzzad. Tekintve, hogy biológiai intelligenciánk lényegében meghatározott kapacitással bír (kivéve néhány viszonylag szerény biotechnológiai optimalizációs lehetőséget), végül a nem biológiai rész kerül túlsúlyba. A 2040-es években, amikor a nem biológiai rész már több milliárdszor nagyobb teljesítményre lesz képes, vajon még mindig az

intelligencia biológiai részéhez kötjük majd a tudatunkat?

Egyértelmű, hogy a nem biológiai entitások is érzelmi és spirituális élményekről tesznek majd tanúbizonyságot, ahogyan napjainkban az ránk is jellemző. Ők – mi – embernek mondják majd magukat, és követelik az embernek kijáró érzelmi és spirituális élmények teljes skáláját. És nem a levegőbe beszélnek, hiszen az ilyen érzésekkel együtt járó gazdag, komplex és kifinomult viselkedést tanúsítanak majd.

De bármilyen fontosak is ezek a követelések és viselkedésformák, vajon miként fognak megjelenni a nem biológiai emberek szubjektív tapasztalásában? Minduntalan visszakanyarodunk a nagyon is valóságos, ám (objektív módszerekkel) végeredményben megmérhetetlen tudat kérdéséhez. Az emberek gyakran úgy beszélnek a tudatról, mintha az az egyén könnyen azonosítható, kimutatható és mérhető, nyilvánvaló tulajdonsága volna. Ám csak egyetlen alapvető igazságot ismerünk arról, miért olyan ellentmondásos a tudat kérdése:

Nem rendelkezünk olyan objektív vizsgálati módszerrel, amelynek segítségével végérvényesen meggyőződhetnénk a jelenlétéről.

A tudomány az objektív mérésekről és azok logikai következtetéseiről szól, de az objektivitás természete olyan, hogy a szubjektív tapasztalat nem mérhető – csak az annak megfeleltethető tényezők, mint a viselkedés (a viselkedésbe beleérttem a belső viselkedést is, azaz egy egyén összetevőinek – a neuronoknak és azok részeinek – cselekvését is).

A fenti korlátok az „objektivitás” és „szubjektivitás” fogalmainak természetéből fakadnak. Alapvetően semmilyen objektív mérési rendszerrel nem vagyunk képesek behatolni egy másik személy szubjektív tapasztalásába. Érvelhetünk róla, például: „Pillantsanak be ennek a nem biológiai egyednek az agyába: láthatják, a működése pont olyan, mint az emberi agyé.” Vagy: „Látják, mennyire megegyezik a viselkedése az emberi viselkedéssel?” Végül azonban ezek mind egyszerű állítások maradnak.

Lehet bármilyen meggyőző egy nem biológiai személy viselkedése, egyes megfigyelők csak akkor fogadják el egy ilyen entitás tudatosságának lehetőségét, ha az ingerületátvivő anyagokat választ ki, DNS-vezérelt fehérjeszintézissel működik, vagy van valami egyéb biológiai jellegű emberi tulajdonsága.

Általában azt feltételezzük, hogy a többi ember tudatos lény, de ez is csupán feltételezés. Az emberek között nincsen arra nézve általános megegyezés, hogy milyen lehet a nem emberi egyedek, például a magasabb rendű állatok tudata. Vegyük példának okáért az állatjogi vitákat, amelyek végső soron arról szólnak, vajon az állatok tudatos lények vagy csak „ösztönös” kvázigépek. A téma még ellentmondásosabbá válik majd a jövő nem biológiai entitásait illetően, amelyek még az állatokénál is emberszerűbb viselkedésről és intelligenciáról tesznek tanúbizonyságot.

A jövő gépei valójában még a mai embereknél is emberszerűbbek lesznek. Ha paradoxonnak tűnik a megállapítás, gondoljunk csak bele, hogy az emberi gondolkodás nagy része szűk látókörű és származékos! Mindannyian csodáljuk Einstein abbéli képességét, hogy egy gondolatkísérlettől eljutott az általános relativitáselméletig, vagy Beethovent, aki olyan szimfóniákat képzelt el, amelyeket nem hallott. Ám a legmagasabb szintű emberi gondolkodás ezen példái ritkák. (Szerencsére meg tudtuk őrizni ezeket a tünékeny pillanatok, és ez olyan lényeges tulajdonságunk, ami elválasztotta az embert a többi állattól.) A jövőbeli, főként nem biológiai ember mérhetetlenül intelligensebb lesz, és az emberi gondolkodás imént említett kifinomultabb tulajdonságait sokkal nagyobb mértékben bírja majd.

Hogyan érthetjük meg tehát a majdani nem biológiai intelligencia tudatát? Gyakorlati szempontból

el kell fogadnunk azt a kijelentését, hogy tudatos lény. Először is: „ők” mi leszünk, így nem különül el élesen a biológiai és nem biológiai intelligencia. Továbbá ezek a nem biológiai lények rendkívüli intelligenciával bírnak majd, és képesek lesznek meggyőzni más embereket (biológiai, nem biológiai, vagy a köztes életformákat) arról, hogy tudatosak. Rendelkeznek majd az összes kifinomult érzelmi bizonyítékkal, amelyek ma meggyőznek minket arról, hogy az emberek tudatos lények. Képesek lesznek megnevetetni és megíratni más embereket. És dühbe gurulnak, ha a többiek nem fogadják el az állításaikat. Ám ez alapvetően politikai és pszichológiai jóslat, nem holmi filozófiai érv.

Én azokkal értek egyet, akik szerint a szubjektív tapasztalás nem létezik, vagy nem lényeges tulajdonság, és mint ilyen, biztonságosan figyelmen kívül hagyható. Annak kérdése, hogy kicsoda vagy micsoda tudatos, illetve, hogy milyen a mások szubjektív élményeinek természete, alapvetően meghatározzák az etikáról, erkölcsiségről és törvényről alkotott elképzeléseinket. A jogrendszerünk nagyjából a tudat gondolatára épül, komoly hangsúlyt fektetve egy másik (tudatos) embernek szenvedést – egy kiváltképp fájdalmas tudati élményt – okozó cselekedetekre, valamint az olyanokra, amelyek megszakítják egy másik ember tudatos tapasztalását (például gyilkosság által).

Vegyes érzelmekkel tekintünk az állatok azon tulajdonságára, hogy képesek szenvedni, amit a törvényhozás is jól példáz. Vannak törvényeink az állatokkal szemben elkövetett kegyetlenségek ellen, amelyekben nagyobb hangsúlyt kapnak az intelligensebb állatok, például a főemlősök (bár úgy tűnik, becsukjuk a szemünket a nagyüzemi állattenyésztéssel járó nagyfokú állati szenvedés előtt, de ez egy másféle értekezés lapjaira tartozik).

Azt akarom mondani, hogy nem tudjuk biztonságosan sutba dobni a tudat kérdését, mint valami udvarias beszélgetésbe illő filozófiai problémát, hiszen az a társadalom jogi és erkölcsi alapjainak központi kérdése. A vita új színezetet nyer majd, amikor egy gép – egy nem biológiai intelligencia – meggyőzően tud érvelni arról, hogy vannak érzései, amelyeket mindenkinek tiszteletben kell tartania. Ha egyszer képesek lesznek humorral fűszerezve előadni ezt – ami kiváltképp lényeges tulajdonság, ha másokat meg akarunk győzni emberi mivoltunkról –, valószínű, hogy megnyerik a vitát.

Úgy hiszem, a jogrendszerünk tényleges változását elsősorban a tárgyalótermek felől, mintsem a törvényhozástól várhatjuk, hiszen a peres eljárások gyakran maguk idézik elő ezeket a változásokat. Az eljövendő átalakulás előjeleként Martine Rothblatt, a Mahon, Patusky, Rothblatt & Fisher ügyvédje 2003. szeptember 16-án benyújtott egy próbaindítványt egy cég ellen, hogy megakadályozza egy tudatos komputer kikapcsolását. Az indítványt a Nemzetközi Ügyvédi Kamara konferenciájának biokibernetikai ülésén tartott próbapaperen tárgyalták meg. ^{[\[664\]](#)}

A szubjektív tapasztalás bizonyos járulékos tulajdonságai mérhetők (például az objektíven mérhető neurológiai tevékenység egyes mintáit követhetjük bizonyos szubjektív élményekről szóló, objektíven igazolható beszámolók segítségével, mint amilyen egy hang észlelése). Azonban objektív mérési módszerekkel nem tudunk behatolni a szubjektív tapasztalás magjába. Mint az első fejezetben már említettem, a tudomány alapját képező, harmadik személyű „objektív” élmény és a tudat szinonímájának számító első személyű „szubjektív” élmény közötti különbséggel van dolgunk.

Gondoljunk csak bele: nem vagyunk képesek igazán megtapasztalni mások szubjektív élményeit! A 2029-es élménysugárzó technológia csak arra teszi majd képessé egy személy agyát, hogy átélje egy másik személy *érzületeit* (és esetleg az érzelmek valamely neurológiai származékát, illetve a tapasztalás egyéb aspektusait), de még mindig nem tudja majd közvetíteni ugyanazokat a *belső* tapasztalásokat, amelyeket az élményt közvetítő személy átél, mert a saját agya különbözik az adott személyétől. Nap mint nap megismerkedünk a mások tapasztalatairól szóló beszámolókkal, és talán még empátiát is érzünk válaszként a belső állapotaikból eredő viselkedésükkel kapcsolatban.

Am mivel csak ezen személyek *viselkedését* ismerhetjük meg, csupán *elképzeltük* szubjektív élményeiket. Tekintve, hogy a tudat kihagyásával is lehet tökéletesen összefüggő tudományos világnézetet felállítani, egyes gondolkodók arra jutottak, hogy a tudat mindössze illúzió.

Jaron Lanier, a virtuális valóság úttörője (az általa „kibernetikus totalizmusnak” nevezett gondolkodásmód ellenében írott értekezésének – amely One Half of a Manifesto [*Egy fél kiáltvány*] címmel jelent meg – hat pontja közül a harmadikban) azok mellett érvel, akik szerint „a szubjektív tapasztalás nem létezik, vagy lényegtelen, hiszen egyfajta külső, perifériális hatás”.^[665] Mint már hangsúlyoztam, nem feltételezhetünk olyan eszközt vagy rendszert, amely határozottan kimutathatná egy egyén szubjektivitását (tudatos tapasztalását).

Bárminemű ilyen eszközt filozófiai előfeltevések terhelnének. Bár Lanier értekezésének nagy részével nem értek egyet (lásd *A szoftveres kritika* cím alatt a kilencedik fejezetben), ebben az egy kérdésben egyezik a véleményünk, és még a csalódottság érzését is el tudom képzelni (és együtt érzek vele!), amit a magamfajta „kibernetikus totalisták” kijelentései láttán érez (nem mintha elfogadnám a rólam adott jellemzését).^[666] Lanierhez hasonlóan még azok szubjektív tapasztalását is el tudom fogadni, akik szerint a szubjektív tapasztalás, mint olyan, nem létezik.

Pontosan azért, amiért objektív mérés és elemzés (tudomány) útján nem tudjuk tökéletesen megválaszolni a tudat kérdését, a filozófia kritikai szerepe felértékelődik. A tudat a legfontosabb ontológiai kérdéssé válik. Hiszen ha igazán el tudnánk képzelni egy világot, amelyben nincsen szubjektív tapasztalás (egy világot, amelyben csak kavargó anyag van, de nincsen tudatos entitás, amely megtapasztalná azt), annak a világnak ennyi erővel nem is lenne szükséges léteznie. Egyes, keleti (például a buddhista szemléletmód egyes iskoláiban), illetve nyugati (különösképpen a kvantummechanika szemléltetőalapú értelmezéseiben) filozófiai hagyományokban pontosan így tekintenek a világra.

RAY: Vitát nyithatunk arról, milyen lények tudatosak, vagy lehetnek tudatosak. Vitázhatunk arról, vajon a tudat emergens tulajdonság, vagy valami meghatározott biológiai vagy egyéb mechanizmus okozza. Azonban van még egy rejtély a tudattal kapcsolatban, ami talán a legfontosabb mind közül.

MOLLY 2004: Csupa fül vagyok.

RAY: Nos, még ha azt feltételezzük is, hogy minden tudattal rendelkezőnek tűnő ember ténylegesen tudattal rendelkezik, az én tudatom miért pont ehhez a bizonyos személyhez, hozzám kapcsolódik? Miért vagyok tudatában ennek a bizonyos személynek, aki gyerekként Tom Swift Jr. könyveket olvasott, majd találmányokkal foglalkozott, könyveket ír a jövőről és így tovább? Minden reggel, amikor felébredek, erről a bizonyos személyről vannak élményeim. Miért nem vagyok, mondjuk, Alanis Morissette, vagy valaki egészen más?

SIGMUND FREUD: Hmm, tehát Alanis Morissette szeretne lenni?

RAY: Igen érdekes feltevés, de valójában nem ez a lényeg.

MOLLY 2004: Mit akarsz mondani? Nem értem.

RAY: Miért vagyok tudatában eme bizonyos személy élményeinek és döntéseinek?

MOLLY 2004: Azért, te butus, mert ez vagy te.

SIGMUND: Úgy tűnik, van valami önben, ami kiváltja a saját nemtetszését. Meséljen róla!

MOLLY 2004: Korábban Ray azt mondta, egészében véve nem szeret ember lenni.

RAY: Nem mondtam, hogy nem szeretek ember lenni. Azt mondtam, nem tetszenek 1.0-s verziószámú testem korlátai, problémái és karbantartási nehézségei. De ez mind nem tartozik

ahhoz, amit mondani akarok.

CHARLES DRAWIN: Az érdekl, hogy ön miért éppen ön? Ez merő szószaporítás, nincs mit beszélni róla.

RAY: Mint oly sok a tudat igazán „nehéz” problémáinak kifejezésére tett próbálkozás, az én mondanivalóm is értelmetlennnek tűnik. De ha érdekel valakit, elmondhatom, mi foglalkoztat valójában: hogy miért vagyok folyamatosan tudatában eme bizonyos személy élményeinek és érzéseinek? Mások tudatát csak elfogadni tudom, de nem érzékelem más emberek tapasztalását, legalábbis nem közvetlenül.

SIGMUND: Most már kezd tisztulni a kép. Nem érzékeli mások tapasztalását? Beszélt valaha valakivel az empátiáról?

RAY: Nézze, most rendkívül személyes értelemben használom a tudat kifejezést!

SIGMUND: Ez az, folytassa csak!

RAY: Az egész valójában remekül példázza, mi történik legtöbbször, amikor az emberek a tudatról akarnak beszélgetni. A beszélgetés elkerülhetetlenül elkanyarodik egy másik irányba, például a pszichológia, a viselkedéstan, az intelligencia vagy a neurológia felé. Ám engem valójában az a rejtély érdekel, hogy miért vagyok ez a bizonyos személy, aki vagyok.

CHARLES: Tudja, valójában ön hozza létre azt a személyt, akivé válik.

RAY: Igen, ez igaz. Mint ahogy az agyunk is létrehozza a gondolatainkat, a gondolataink létrehozzák az agyunkat.

CHARLES: Tehát létrehozta magát, és ezért az, aki, hogy így fejezzem ki magam.

MOLLY 2104: 2104-ben ezt nagyon is a bőrünkön érezzük. Nem biológiai lényként képes vagyok bármikor megváltoztatni magamat. Mint már korábban is megbeszéltük, ha úgy tartja kedvem, gondolatmintáimat össze tudom vegyíteni valaki máséval, és létrehozok egy kevert identitást. Elég mély élmény tud lenni.

MOLLY 2004: Nos, kedves jövőbeli Molly kisasszony, ezt mi is csináljuk a primitív 2004-es évben. Úgy hívjuk, szerelem.

Ki vagyok? Mi vagyok?

„Miért vagy te te?”

(A YRUU mozaikszóban [Young Religious Unitarian Universalists – Fiatal Vallásos Unitárius Univerzalisták] elrejtett kérdés. Ebben a szervezetben tevékenykedtem fiatalkoromban, az 1960-as években. [Akkoriban LRY-nak, Liberal Religious Youthnak – Liberális Vallásos Fiataloknak neveztük magunkat]).

„Amit keresel, az figyeli lépteidet.”

(Assisi Szent Ferenc)

„Túl sok mindent nem tudok.

Tudom, amit tudok, ha érted, hogy értem.

A filozófia duma a zabpelyhes dobozon.

A vallás mosoly a kutyaprofilon...

A filozófia séta a csúszós köveken.

A vallás fényforrás a ködben...

Ami vagyok, az vagyok.

Te az vagy, ami vagy, vagy mi?”

(Eddie Brickell: What I Am – Ami vagyok)

„A szabadság az a képesség, hogy örömmel teszem, amit tennem kell.”

(Carl Jung)

„A kvantumfizikus által emlegetett véletlen nem egyenlő a Szent Ágoston-i erkölcsi szabadsággal.”

(Norbert Wiener)^[667]

„Valami hagyományos halálnem helyett azt szeretném, ha néhány barátommal együtt eltennének egy hordócska madeirában, amíg egyszer csak kedves országom napmelege visszaszólít az életbe! De minden valószínűség szerint túl kevésbé fejlett évszázadban élünk, és a tudomány gyermekora túlontúl friss emlék még ahhoz, hogy saját korunkban meglássuk, miként érik meg egy efféle mesterség.”

(Benjamin Franklin, 1773)

Létezik egy másik, a tudattal kapcsolatos kérdés is: a saját identitásunk. Korábban tárgyaltam annak lehetőségét, miként tudnánk feltölteni egy egyén elméjének mintáit – a tudását, a képességeit, a személyiségét, az emlékeit – egy másik szubsztrátumba. Bár az új entitás éppen úgy cselekedne, mint én, a kérdés fennáll: valóban *én* lennék az?

A radikális életmeghosszabbítás néhány forgatókönyve tartalmazza a testünkből és agyunkból álló rendszerek és alrendszerek újratervezését és újbóli felépítését. Ha részt veszek egy efféle rekonstrukciós folyamatban, közben elveszítem magamat? Az elkövetkező néhány évtizedben ez a kérdés is úgy jár majd, mint az előző probléma: évszázados filozófiai dialógusból sürgető, gyakorlati aktualitássá lép elő.

Ki is vagyok én? Talán csak egy minta, hiszen folyamatosan változom? Mi van, ha valaki lemásolja ezt a mintát? Az eredeti leszek és/vagy a másolat? Talán nem vagyok más, mint zagyva anyag – azaz a testemet és agyamat felépítő, egyszerre rendezett és kaotikus molekulahalmaz.

De van valami gond ezzel az állásponttal. A testem és agyam által alkotott meghatározott részecskehalmaz valójában teljességgel különböző azoktól az atomoktól és molekuláktól, amelyekből kis idővel ezelőtt felépültem. Tudjuk, hogy legtöbb sejtünk hetek leforgása alatt megújul, és még a viszonylag hosszú ideig külön sejteket alkotó neuronjaink is havonta lecserélik minden alkotómolekulájukat.^[668] Egy mikrotubulus (a neuron szerkezetét felépítő fehérjerost) felezési ideje körülbelül tíz perc. A dendritekben található aktinrostok körülbelül negyven másodpercenként cserélődnek. A szinapszisokat működtető fehérjék körülbelül óránként megújulnak. A szinapszisokban lévő NMDA-receptorok pedig viszonylag hosszú ideig – öt napig – maradnak a szervezetben.

Így hát teljesen más anyagból vagyok, mint egy hónappal ezelőtt, és csupán az anyag elrendezésének a terve állandó. A minta is változik, de lassan és folyamatosan. Olyan vagyok, akár a minta, amit a víz rajzol a folyóba, amikor átszalad a kövek között. A víz valódi molekulái minden ezredmásodpercben lecserélődnek, de a minta órákig, vagy akár évekig megmarad.

Ezért hát talán azt kell mondanunk, hogy az idő során fennmaradó anyag- és energiamintákból állok. Ám ezzel a definícióval is van egy kis probléma, hiszen végül fel tudjuk majd tölteni ezt a mintát és

sokszorosítani tudjuk a testemet és agyamat a pontosság olyan magas fokáig, hogy a másolat megkülönböztethetetlen lesz az eredetitől (azaz a másolat átmenne egy „Ray Kurzweil” Turing-teszten). Így hát a másolat ugyanazt a mintát használja majd, mint én. Az lehet az ellenvetés, hogy nem sikerülhet minden részletet helyesen eltalálni, de idővel az idegi és testi másolatok létrehozására irányuló kísérleteink megoldása és pontossága ugyanazzal az exponenciális gyorsasággal javul majd, amely minden információs technológiát irányít. Végül képesek leszünk megragadni és reprodukálni jól felismerhető idegi és fizikai részletekből álló mintánk, és tesszük ezt a kívánt pontossággal.

Bár a másolat mintája ugyanaz lenne, mint az enyém, nehéz volna azt állítani, hogy a másolat én vagyok, hiszen még én is léteznék ugyanakkor. Álmomban is letapogathatna és lemásolhatna valaki. Ha ez a személy reggel azzal fogadna, hogy: „Jó híreim vannak, Ray, sikeresen átültettük egy tartósabb szubsztrátumba, így a régi testére és agyára nincs többé szükségünk”, talán nem értenék vele egyet.

Ha a gondolkísérletet vesszük, egyértelmű, hogy bár a másolat éppen úgy néz ki és éppen úgy cselekszik, mint én, a másolat mindazonáltal *nem* én vagyok.

Még csak nem is kell tudnom, hogy a másolat elkészült. Bár az én emlékeimmel rendelkezne és emlékezne rá, hogy ő valamikor én voltam, Ray 2-nek keletkezési idejétől számítva saját egyedi élményei lennének, és a valósága egyre inkább eltérne az enyémtől.

Ez a gondolatmenet igen erőteljesen megjelenik a krionikában. (Azaz egy frissen elhunyt ember lefagyasztás általi tartósításában. E módszernek a célja a későbbi „újraélesztés” egy olyan korban, amikor már létezik technológia a haldoklási folyamat korai szakasza, a fagyasztásos tartósítás és a halált okozó betegség által okozott károsodások visszafordítására.)

Ha feltételezzük, hogy a „tartósított” személyt végül újraélesztik, a javasolt módszerek nagy része azt sugallja, hogy az újraélesztett személyt új anyagokból „újra felépítik”, valamint radikálisan újszerű, neuromorf (az idegrendszer szerkezetével megegyező) rendszerrel látják el.

Így az újraélesztett személy gyakorlatilag „Ray 2”-vé válik (azaz valaki mássá lesz).

Kövessük egy kicsit tovább ezt a gondolatmenetet! Egykettőre kiderül, hogy egy dilemmába ütközünk. Amennyiben lemásolnak engem, majd megsemmisítik az eredetit, azzal nekem végem, hiszen ahogyan már fentebb láttuk, a másolat nem én vagyok. Ha a másolat meggyőzően játssza el a szerepemet, senkinek sem tűnik majd fel a különbség, mindazonáltal én nem létezem többé.

Vegyünk egy olyan esetet, amikor az agyam egy kicsiny részét annak neuromorf megfelelőjére cserélik!

Még mindig itt vagyok: a műtét sikerrel járt (egyébiránt a nanobotok ezt orvosi beavatkozás nélkül is elvégzik majd).

Már ismerünk ilyen embereket, például olyanokat, akik cochleáris implantátummal rendelkeznek, Parkinson-kór elleni beültetést kaptak és így tovább.

Most cseréljük ki az agyam egy másik részét! Jó, még mindig itt vagyok... aztán újra... A folyamat végén még mindig önmagam vagyok.

Soha nem is létezett „régí Ray” és „új Ray”, ugyanaz vagyok, aki azelőtt voltam. Senki sem fedezte fel, hogy eltűntem, még én magam sem.

Ray fokozatos lecserélése Ray-t eredményez, így a tudat és az identitás megőrződni látszik.

A fokozatos csere esetén azonban nem beszélhetünk a régi én és az új én egyidejűségéről. A folyamat végén az új énem megfelelőjét kapjuk (azaz Ray 2-t), és nem a régi énemet (Ray 1-et). Így a fokozatos csere is a vesztemet jelenti. Fel kell tehát tennünk a kérdést: mely ponton lett a testemből és agyamból valaki más?

Megint másrésről azonban (lassan kifogyunk a filozófiai részekből), amint azt a kérdésfeltevés elején hangsúlyoztam, énem folyamatos lecserélése valójában a mindennapi biológiai folyamataim részét képezi. (Ez a csere mellesleg nem is kifejezetten fokozatos, hanem inkább ugrásszerű.) Összegzésünk alapján tehát az egyetlen állandó dolog velem kapcsolatban az anyag és energia térbeli és időbeli mintája. Ám a fenti gondolat kísérlet rámutat, hogy a fokozatos lecseréléssel én akkor is eltűnök, ha közben a mintám megmarad. Lehetséges, hogy van valaki, aki folyamatosan lecseréli engem, olyasvalakire, aki csak nagyon úgy tűnik, mintha a pár másodperccel korábbi én lennék?

És megint csak visszatérünk a kérdéshez: ki vagyok? Ez a legvégső ontológiai kérdés, amelyet gyakran a tudat problémájának nevezünk. Tudatosan (a szóvicc szándékos) első személyben fogalmaztam meg a kérdést, mert a kérdés természete így kívánta. Nem lehet harmadik személyben feltenni. Tehát a kérdésem nem pontosan az, hogy „ki vagy te?”. Mindazonáltal, nyájas olvasó, te is felteheted magadnak ezt a kérdést.

Amikor az emberek a tudatról beszélnek, gyakran a tudat viselkedéstani és neurológiai megfelelőiről vitáznak (például, hogy képes-e egy entitás teljes önreflexióra). Ám ezek harmadik személyű (objektív) kérdések, és semmi közük sincsen ahhoz, amit David Chalmers a tudat „fogós kérdésének” nevez: hogyan következhet az anyagból (az agyból) valami látszólag anyagtalan, mint a tudat?^[669]

Azt, hogy egy entitás tudatos-e, vagy sem, csak az adott entitás tudhatja. A tudat neurológiai megfelelői (mint az intelligens viselkedés) és ontológiai valósága közti különbség megegyezik az objektív és szubjektív valóság különbségével. Ezért nem tudunk kitalálni olyan objektív tudatdetektort, amely nem filozófiai feltételezések alapján dolgozik.

Mélyen hiszek benne, hogy mi, emberek egyszer elfogadjuk a nem biológiai lényeket tudatosnak, mert a nem biológiai lények végül minden olyan kifinomult tulajdonsággal rendelkeznek majd, amelyekkel az emberek ma bírnak, és amelyeket az érzelmi és egyéb szubjektív tapasztalásokhoz kapcsolunk. Ám annak ellenére, hogy képesek leszünk azonosítani ezeket a kifinomult tulajdonságokat, nem nyerünk bebocsátást a mögöttük rejlő tudatba.

Elismerem, önök közül sokan tudatos lénynek tűnnek a szememben, de nem szabad meggondolatlanul hinnem a benyomásaimnak. Talán valójában egy szimulált világban élek, amelynek önök mind a részei.

Vagy talán csak az önökről alkotott emlékeim léteznek, és a valós élmények soha nem történtek meg.

Vagy az is lehet, hogy most csupán emlékek látszó gondolatok előhívását érzékelem, de sem az élmények, sem a róluk alkotott emlékek nem valósak. Ugye, értik?

A fenti dilemmák ellenére személyes filozófiámat továbbra is a „mintaizmusra” építem, azaz arra az elgondolásra, hogy én alapvetően egy időben létező minta vagyok. Egyben fejlődő minta is, és befolyásolni tudom a mintám fejlődését. A tudás minta, ami különbözik a puszta információtól, és a tudás elvesztése nagy tragédia. Így egy személy elvesztése a legnagyobb tragédia.

MOLLY 2004: *Ami engem illet, elég egyértelmű, hogy én ki vagyok – alapvetően ez a test és agy, amelyek legalább ebben a hónapban kifejezetten jó formában vannak.*

RAY: *És mi a helyzet az emésztőcsatornádban lévő étellel, amely az erjedés különböző szintjein leledzik?*

MOLLY 2004: *Na jó, azt is vegyük hozzá. Egy része beépül az énembe, de egyelőre még nem folyamodtak a „Molly része” klubtagságért.*

RAY: Nos, a testedben lévő sejtek kilencven százaléka nem a saját DNS-edet tartalmazza.

MOLLY 2004: Valóban? Akkor kiét?

RAY: A biológiai embereknek körülbelül tízbillió sejtje tartalmazza a saját DNS-üket, de ezenkívül él még úgy százbillió mikroorganizmus is az emésztőcsatornában, főként baktériumok.

MOLLY 2004: Nem túl bizalomgerjesztő. És mindre szükség van?

RAY: Valójában mind a Mollyt életben és egészségben tartó sejtek társadalmának tagjai. Egészséges bélbaktériumok nélkül nem maradhatnánk életben. Amennyiben a bélflórád egyensúlyban van, ezek szükségesek az egészséges élethez.

MOLLY 2004: Rendben, de én mégsem tartom őket az énem részének. Sok olyan dolog van, amitől függ az egészségem. Például a házam és az autóm, amelyeket ennek ellenére nem tartok az énem részének.

RAY: Oké, hagyjuk ki a bélrendszer teljes tartalmát, baktériumokkal együtt! Ez megegyezik azzal a képpel, amit a tested lát rólad. Hiába van a bélcsatorna fizikailag a testen belül, a test külső dolognak látja azt, és gondosan megszűri az emésztőcsatornából a véráramba kerülő anyagokat.

MOLLY 2004: Minél többet gondolkodom azon, ki vagyok, egyre inkább olyanná válok, mint Jaron Lanier „empátiaköre”.

RAY: Nocsak, ez érdekes!

MOLLY 2004: Alapvetően arról van szó, hogy az általam „én”-nek tartott valóság nem egyértelműen körülhatárolható. Nem csak a testemről van szó. Kevéssé azonosítom magam, mondjuk, a lábujjaimmal, és a legutóbbi beszélgetésünk óta a beleim tartalmával még kevésbé.

RAY: Ez érthető. De ha az agyunkra gondolunk, az ott történő dolgoknak is csupán egy kis szeletét ismerjük.

MOLLY 2004: Igaz, hogy vannak az agyamnak olyan részei, amelyek mintha valaki máséi lennének, vagy legalábbis valahol másutt lennének. A tudatos énem figyelme elé tolakodó gondolatok és álmok gyakran mintha valami egész más helyről érkeznének. Nyilvánvalóan az agyamból kerülnek elő, de nekem nem úgy látszik.

RAY: Vagy fordítva: a fizikailag távol lévő szeretteink olyan közel állnak hozzánk, hogy szinte a részeinknek érezzük őket.

MOLLY 2004: Az énem határai egyre inkább elmosódnak.

RAY: Várd csak ki a végét, amikor már túlnyomórészt nem biológiai lények leszünk! Akkor kedvünkre összevegyíthetjük a gondolatainkat és gondolkodásunkat, és a határok még kevésbé látszanak majd tisztán.

MOLLY 2004: Ez egész jól hangzik. Tudod, bizonyos buddhista filozófiák kihangsúlyozzák, mennyire nincsenek alapvető határok az emberek között.

RAY: Mintha csak a szingularitásról beszélnének!

A szingularitás mint transzcendencia

„A modernitás nézőpontjából az emberiség alacsonyabb rendű életformából fejlődött ki – az élet a mocsokban kezdődik, és az intelligenciával végződik –, míg a hagyományos

kultúrák szerint felsőbbrendű elődöktől származik. Az antropológus Marshall Sahlins megfogalmazásában: »Mi vagyunk az egyedüliek, akik szerint az emberszabású majmoktól származunk. Mindenki más meg van győződve róla, hogy az őseink istenek voltak.«”

(Huston Smith)⁽⁶⁷⁰⁾

„Egyes filozófusok szerint a filozófia az, amit addig alkalmazunk egy problémára, amíg az elég világossá nem válik a tudomány megoldásai számára. Mások úgy tartják, hogy amennyiben egy filozófiai probléma empirikus módszerekkel is megoldható, az valójában sohasem volt filozófiai jellegű.”

(Jerry A. Fodor)⁽⁶⁷¹⁾

A szingularitás egy az anyagi világban bekövetkező eseményt jelöl, a biológiai evolúcióval kezdődő és az ember által irányított technológiai evolúción át fejlődő folyamat következő, szükségszerű lépését.

Ám éppen az anyag és energia világában tapasztaljuk meg azt a transzcendenciát, amellyel az emberek legfőképpen a vallásos életet jellemzik. Vegyük számba a fizikai világban megnyilvánuló spiritualitás természetét!

Hol is kezdjem? Mondjuk a vízzel? Elég egyszerű vegyület, de figyeljük csak meg megannyi gyönyörű megnyilvánulási formáját: amint patak formájában végtelen számú, változó mintában zúg a kövek között, aztán kaotikus zuhatagban omlik alá (mindezt egyébként jól látom az irodaablakomból); hogy az égen vonuló felhők fodrozódó mintáit, a hegyen elfekvő hótakarót, vagy egyetlen hópihe nyugalmat sugárzó, rendezett felépítését már ne is említsem! Vagy vegyük Einstein leírását a pohárban lévő víz összeolvadó rendjéről és rendezetlenségéről (más szóval a Brown-féle mozgás ellenőrző kísérletét)!

De a biológiai világ egyéb mintáit is szemügyre vehetjük: például a DNS spiráljainak bonyolult táncát a mitózis alatt. Vagy gondoljuk meg, milyen kedves a fa, amint hajladozik a szélben, és levelei kusza táncot járnak! De ilyen a mikroszkóp lencséje alatt sürgő-forgó világ is. A transzcendencia mindenütt jelen van.

Úgy érzem, rövid magyarázattal tartozom a „transzcendencia” szót illetően. „Transzcendens” az, ami „meghalad” egy bizonyos szintet, de ezzel együtt nem kell elfogadnunk azt a finomkodó dualista nézőpontot, miszerint a valóság transzcendens szintjei (mint például a spirituális szint) nem e világról valók. A minták erejével is „meghaladhatjuk” a materiális világ „hétköznapiságát”.

Bár sokan materialistának tartanak, én „mintaistaként” tekintek magamra. Hiszem, hogy az ember a minták folyamatban megmutatkozó hatalma által érheti el a transzcendenciát. Mivel az anyag, amiből vétettünk, hamar lecserélődik, csak a mintánk transzcendens ereje maradandó.

A minták tartóssága meghaladja az explicite önmagukat sokszorosító rendszereket, például a szerves élőlényeket és az önsokszorosító technológiákat. A minták maradandósága és hatalma révén létezik az élet és az intelligencia. A minta sokkal fontosabb, mint az azt felépítő anyag.

A véletlenszerű ecsetvonások a vásznon csak festékként értelmezhetők. Ám amikor a megfelelő módon rendezzük el őket, meghaladják pusztán anyagi létüket, és művészetté válnak. A véletlenszerű zenei hangok csupán zajok. Ha „ihlet” hatása alatt sorokba rendezzük őket, zenét kapunk. Az összetevők halmaza csupán jegyzék. Amennyiben újszerű módon igazítjuk el őket, egy szoftver (egy újabb minta) hozzáadásával, létrejön a technológia „varázsa” (transzcendenciája).

Habár egyesek a transzcendencia alatt kizárólag a „spiritualitást” értik, a transzcendencia a valóság minden szintjét érinti: a természet alkotásait, a magunkfajta lényeket ugyanúgy, mint saját alkotásainkat a művészet, a kultúra, a technológia, az érzelmi és vallási kifejezés területein. Az evolúció a minták világában zajlik, és az evolúciós folyamat során mindenekelőtt a minták mélysége és sorrendje változik. Evolúciónk betetőzéseként a szingularitás fogja elmélyíteni a transzcendencia mindezen megjelenési formáit.

A „spirituális” szó másik jelentése az, hogy „*spiritusszal*, azaz lélekkel rendelkező”, más szóval tudatos.

Sok filozófiai és vallási hagyomány a tudatot – a személyesség trónját – tekinti valósnak. A buddhista ontológiák közös nevezője a szubjektív – tudatos – élmény, ami szerintük a fizikai vagy objektív jelenségekből álló *májával* (illúzióval) szemben az egyetlen igazi valóság.

Ebben a könyvben a tudatról felsorakoztatott érveimmel a tudat következő nyugtalanító és paradox (épp ezért mélyenszántó) tulajdonságát kívánom bemutatni: miként lehet, hogy egy adott feltételezés (azaz, hogy az elmém másolatában jelen van vagy nincsen jelen a tudatom) végeredményben pont egy homlokegyenest ellenkező értelmezéshez vezet.

Azt feltételezzük, hogy az emberek tudatos lények, legalábbis amikor annak látszanak. A másik oldalon viszont azt feltételezzük, hogy az egyszerű gépek nem rendelkeznek önálló tudattal. A kozmológiai értelemben vett univerzum inkább gépként, mint tudatos lényként működik. Ám amint azt az előző fejezetben láttuk, a körülöttünk lévő anyag és energia egyszer majd megtelik ember-gép-civilizációnk intelligenciájával, tudásával, kreativitásával, szépségével és érzelmi intelligenciájával (például a szeretet képességével). Akkor civilizációnk majd kifelé tágul, isteni intelligenciával ruház fel minden általunk megérintett ostoba anyagot és energiát – transzcendens anyaggá és energiává alakítva azokat. Bizonyos értelemben tehát a szingularitás végül áthatja a világegyetemet lélekkel.

Az evolúció nagyobb komplexitás, nagyobb elegancia, nagyobb tudás, nagyobb intelligencia, nagyobb szépség, nagyobb kreativitás és a szeretethez hasonló kifinomult tulajdonságok növelése felé irányul. Minden monoteista hagyomány ezekkel a tulajdonságokkal írja le Istent, csak felső határ nélkül: végtelen tudás, végtelen intelligencia, végtelen szépség, végtelen kreativitás, végtelen szeretet és így tovább. Természetesen még az evolúció egyre gyorsuló gyarapodása sem éri el a végtelen szintjét, ám exponenciális robbanása folytán gyorsuló ütemben halad a végtelen irányába. Így hát az evolúció mindenképpen az Isten eme koncepciója felé tart, akkor is, ha sohasem érheti el ezt az ideált. Ezért hát gondolkodásunk felszabadítása a biológiai forma szűk korlátai alól alapvetően spirituális vállalkozás.

MOLLY 2004: *Tehát hiszel Istenben?*

RAY: *Hát, Isten egy ötbetűs szó – és egy rendkívüli erejű mém.*

MOLLY 2004: *Tudom, hogy létezik ez a szó és a fogalom. De valami olyanra utal, amiben hiszel?*

RAY: *Az emberek sok mindent értenek alatta.*

MOLLY 2004: *Te hiszel azokban a dolgokban?*

RAY: *Nem lehetséges hinni mindazokban a dolgokban: Isten egy mindenható, tudatos személy, aki vigyáz ránk, egyezségeket köt és néha jócskán méregbe gurul. Vagy Ő – Az – egy mindent átható életerő, ami minden szépség és kreativitás alapja. Vagy Isten megteremtett mindent, és aztán visszalépett a színpalak mögé...*

MOLLY 2004: *Értem, de hiszel-e valamelyikben?*

RAY: *Hiszem, hogy az univerzum létezik.*

MOLLY 2004: *Várjunk csak: ez nem hit kérdése, hanem tudományos tény!*

RAY: *Valójában nem tudhatom biztosan, hogy a saját gondolataimon kívül bármi más létezik.*

MOLLY 2004: *Na jó, értem én, hogy ez a filozófiai fejezet, de az ember olvashat olyan tudományos munkákat – több ezernyi –, amelyek megerősítik a csillagok és galaxisok létezését. És ezek a galaxisok alkotják azt, amit mi világegyetemnek hívunk.*

RAY: *Igen, hallottam róla, és emlékszem, hogy magam is olvastam néhány ilyen tanulmányt, de nem tudom, hogy ezek a dolgozatok csakugyan léteznek-e, vagy a dolgok, amelyekre utalnak, valóban léteznek-e a gondolataimon kívül is.*

MOLLY 2004: *Tehát nem fogadod el az univerzum létezését?*

RAY: *Nem erről van szó: csak annyit mondtam, hogy elfogadom a létezését, ám felhívtam rá a figyelmet, hogy az egész mindössze attól függ, hiszek-e benne. Az én személyes döntésem kérdése.*

MOLLY 2004: *Rendben, de én azt kérdeztem, hiszel-e Istenben?*

RAY: *Ismétlem: az „Isten” egy szó, ami alatt az emberek különböző dolgokat értenek. A kedvedért mondhatjuk, hogy Isten a világegyetem, és én azt állítottam, hogy hiszek a világegyetem létezésében.*

MOLLY 2004: *Isten csak a világegyetemmel lenne egyenlő?*

RAY: *Csak? Azért az univerzum elég nagy dolog ahhoz, hogy a „csak” szóval illessük. Ha elhisszük, amit a tudomány tanít – és én azt állítottam, elhiszem –, nem tudunk az univerzumnál nagyobb jelenséget elképzelni.*

MOLLY 2004: *Valójában sok fizikus szerint a világegyetemünk csak egyetlen buborék a nagyszámú univerzumok sorában. De azt akartam mondani, hogy az emberek általában többet értenek az „Isten” szó alatt, mint „csak” az anyagi világot. Néhányan az összes létező dologgal azonosítják Istent, mégis tudattal rendelkezőnek képzelik el. Tehát te egy nem tudatos Isten létezésében hiszel?*

RAY: *Az univerzum nem tudatos – egyelőre. De egyszer az lesz. Szigorúan véve azt mondhatjuk, ma nagyon kicsiny része tudatos. Ám ez hamarosan megváltozik. Úgy hiszem, az univerzum a hatodik korban isteni intelligenciát ölt, és felébred. Most csak abbéli hitemet szögeztem le, hogy az univerzum létezik. Ha úgy döntünk, hogy elhisszük mindezt, az konkrétan nem hitet ébreszt bennünk, hanem valamiféle tájékozott megértést, ami szintén az univerzum létezését állító tudományra támaszkodik.*

MOLLY 2004: *Érdekes. Tudod, ez lényegében az ellentéte annak a nézetnek, hogy egyszer létezett egy tudatos teremtmény, aki mindent beindított, aztán leköszönt. Alapvetően azt mondom, hogy egy tudatos univerzum a hatodik korszakban „meghajol és bemutatkozik”.*

RAY: *Igen, ez a hatodik korszak lényege.*

Nyolcadik fejezet

A GNR mélyen összefonódó lehetősége és veszélye

„Tervek nélkül, kontroll nélkül, fékek nélkül száguldunk át ebbe az új évszázadba... Egyetlen reális alternatívát látok, a lemondást: a túl veszélyes technológiák fejlesztésének korlátozását, bizonyos fajta ismeretek megszerzésének a korlátozását.”

(Bill Joy: Why The Future Doesn't Need Us [Miért nincs szüksége ránk a jövőnek])

„A környezetvédőknek meg kell elégedniük egy olyan világ eszméjével, ami elég gazdag és technológiailag elég fejlett, és nem szabad többet akarniuk.”

(Bill McKibben, környezetvédő, aki először írt a globális felmelegedésről)⁽⁶⁷²⁾

„A fejlődés régen jó volt, de most már túl messzire ment.”

(Ogden Nash, 1902–1971)

„Az 1960-as évek végén radikális környezetvédő lettem. Egy szedett-vedett aktivistacsoporttal felültünk egy ócska, lyukas hajóra, és átvágtunk a Csendes-óceán északi felén, hogy megakadályozzuk a Nixon elnöksége alatti utolsó hidrogénbomba-próbarobbantást. Közben többekkel együtt megalapítottuk a Greenpeace-t... A környezetvédők gyakran állnak elő ésszerűnek tűnő érvekkel, miközben jó cselekedeteket hajtanak végre, például bálnákat mentenek meg és tisztábbá teszik a vizeket meg a levegőt. Mostanra azonban kibújt a szög a zsákból. A környezetvédők hadjárata általában véve a biotechnológia, konkrétan pedig a génmódosítás ellen egyértelműen leleplezte szellemi és erkölcsi csődjüket. Azzal, hogy a zéró tolerancia politikáját hirdetik egy olyan technológiával szemben, amely potenciálisan rengeteg előnyt jelenthet az emberiségnek és a környezetnek... szembekerültek a tudósokkal, az értelmiséggel és az internacionalistákkal. Elkerülhetetlen, hogy idővel a média és a közvélemény is felismerje álláspontjuk tarthatatlanságát.”

(Patrick Moore)

„Továbbra sem értek velük egyet a motorkerékpár ápolásának kérdésében, de nem azért, mintha technológiaellenességüket mindenestül elutasítanám. Inkább azt hiszem, öngólt lönek vele. A Buddha, az Istenség éppúgy lakozhat a nyomtatott áramkörben vagy a motorkerékpár fogaskerekeiben, mint hegycsúcson vagy virág szirmaiban. Aki másként vélekedik, a Buddhát fitymálja – vagyis magamagát.”

Gondoljuk végig ezeket a cikkeket, amelyeket nem szívesen látnánk szabadon hozzáférhetően az interneten:

- Ejtse ámulatba ellenségét: hogyan építsünk atombombát könnyen beszerezhető anyagokból?^[673]
- Hogyan módosítsuk az egyetemi laboratóriumban az influenzavírust úgy, hogy kígyómérget termeljen?
- Az *E. coli* vírus tíz egyszerű módosítása.
- Hogyan tegyük rezisztenssé a himlőt a védőoltással szemben?
- Építsünk vegyi fegyvert az interneten fellelhető anyagokból!
- Hogyan építsünk pilóta nélküli, önvezérlő, alacsonyan repülő repülőgépet olcsó alkatrészekből, GPS-szel és egy lappal?

Vagy hogy tetszenének ezek?

- A tíz legveszélyesebb kórokozó genomja.
- A legmagasabb felhőkarcolók tervrajzai.
- Az amerikai atomreaktorok tervrajzai.
- A modern társadalom száz leggyengébb pontja.
- Százmillió amerikai állampolgár orvosi adataihoz való internetes hozzáférés a rendszer tíz leggyengébb pontjának kihasználásával.
- A legforgalmasabb pornográf oldalak ügyféllistája.

Azt, aki az első cikket feltenné az internetre, szinte biztosan azonnal felkeresné az FBI, ahogy az 2000 márciusában megtörtént Nate Ciccolóval, egy tizenöt éves középiskolással. Természettudomány órára készülve elkészítette egy atombomba papírmásé modelljét, amely zavarba ejtően pontosnak bizonyult. A kirobbanó médiafelhajtás során Ciccolo így nyilatkozott az ABC News-nak: „Tudja, valaki mondta, hogy az internetről mindenféle információt be lehet szerezni. Én meg nem igazán voltam naprakész fizikából. Gondoltam, kipróbálom. Felmentem a netre, és néhány kattintással megtaláltam, amit kerestem.”^[674]

Ciccolónak természetesen nem volt a birtokában a legfontosabb elem, a plutónium, és nem is állt szándékában beszerezni, de az eset nagy port vert fel a médiában, a nukleáris technológiai ismeretek elterjedése miatt aggódó hatóságokról nem is beszélve.

Ciccolo a saját állítása szerint 563 olyan weboldalt talált, ami atombomba építésével foglalkozott, és az ügy kirobbanása után sürgős erőfeszítéseket tettek ezek eltávolítására. Sajnos információt eltüntetni az internetről olyan, mintha egy seprűvel próbálnánk visszaterelni az óceánt. Az említettek közül egyes oldalak még ma is elérhetőek. Ebben a könyvben nem adom meg az URL-eket, de nem nehéz megtalálni őket.

Noha a fenti cíkcímeket én találtam ki, az összes témában találunk írásokat az interneten.^[675] A web hihetetlen kutatási eszköz. Saját tapasztalatom szerint a régen fél napot igénybe vevő könyvtári keresgélést általában két-három perc alatt le lehet tudni a neten.

Ennek nyilvánvaló és óriási előnyei vannak a jó szándékú technológiák fejlődése szempontjából, de azok kezében is hatalom, akiknek az értékrendje ártalmas a társadalom többsége számára. Tehát

veszélyben vagyunk? A válasz egyértelműen igen. Ez a fejezet azzal foglalkozik, hogy mekkora ez a veszély, és mit tehetünk ellene.

A témával kapcsolatos aggodalmam legalább két évtizedes. Amikor az 1980-as évek közepén megírtam a *The Age of Intelligent Machines*-t (*Az intelligens gépek kora*), mély aggodalommal töltött el az akkor kialakuló génmódosító eljárásokat azon lehetősége, hogy a hozzáértők a könnyen beszerezhető felszerelésekkel úgy módosíthatják a bakteriális és vírusos kórokozókat, hogy ezáltal új betegségek jönnek létre.^[676] A génmódosított kórokozók rossz szándékú vagy pusztán gondatlan kezekbe kerülve nagyon fertőzőek, észrevétlenek és veszélyesek lehetnek.

Az 1980-as években, ha nehezen is, de meg lehetett volna valósítani ezt. Ma már tudjuk, hogy a Szovjetunió és más országok biológiai fegyverkezési programjai éppen ezzel foglalkoztak.^[677] Akkor tudatosan eldöntöttem, hogy nem beszélek erről a kísértetről a könyvemben, mert nem akartam destruktív ötleteket adni rossz embereknek. Nem szerettem volna egy nap arra bekapcsolni a rádiót, hogy katasztrófa történt, és az okozói azt állítják, Ray Kurzweiltől vették az ötletet.

Részben ennek a döntésnek a következményeként a könyvem kritikusai nem alaptalanul rótták fel nekem, hogy csak a jövőbeli technológiák előnyeit hangsúlyozom, nem véve tudomást a hátulütőiről. Ezért 1997–98-ban, a *The Age of Spiritual Machines* (*A spirituális gépek kora*) írása közben igyekeztem a lehetőségekre és a veszélyekre is kitérni.^[678] A téma ekkor már eléggé átkerült a köztudatba (például az 1995-ös, *Vírus* című filmmel, ami egy új vírusos kórokozó elszabadulása nyomán kialakuló rémületet és pánikot mutatja be) ahhoz, hogy úgy érezzem, nyugodtan beszélhetek nyilvánosan a problémáról.

1998 szeptemberében, éppen befejezve a kéziratot, egy Lake Tahoe-i bárban összefutottam Bill Joyjal, régi, nagyra becsült kollégámmal a high-tech világban. Noha régóta csodáltam Joyt az interaktív webes rendszerek vezető nyelvének (Java) kifejlesztése során és a Sun Microsystems társalapítójaként végzett úttörő munkájáért, ott, a bárban mégsem rá, hanem a kis boxban ülő harmadik személyre, John Searle-re koncentráltam. Searle, a Kaliforniai Egyetem híres filozófusa, pályafutása során olyan materialistákkal szemben védte meg az emberi tudatosság mély rejtélyeit, mint például Ray Kurzweil (bár ezt a jelzőt a következő fejezetben vissza fogom utasítani).

Searle és én nem sokkal korábban arról vitáztunk George Gilder Telecosm konferenciájának záróülésén, hogy vajon egy gép tudatos lehet-e.

Az ülés címe az volt, hogy *Spirituális gépek*, és a megjelenés előtt álló könyvem filozófiai implikációjával foglalkozott. Joynak adtam egy példányt a kéziratból, és megpróbáltam összefoglalni neki a Searle-lel a tudatosságról folytatott vitánkat.

Mint kiderült, Joyt teljesen más problémák foglalkoztatták, nevezetesen a könyvemben bemutatott három, megszületőben lévő technológia, a genetika, a nanotechnológia és a robotika (a GNR, ahogy a korábbiakban tárgyaltam) veszélyei az emberi civilizációra. A jövőbeli technológiák veszélyeiről megfogalmazott gondolataim aggodalommal töltötték el Joyt, ahogy azt később a *Wired*-ben megjelent, *Why the Future Doesn't Need Us* (*Miért nincs szüksége ránk a jövőnek*) című híres cikkében meg is fogalmazta.^[679] A cikkben Joy elmondja, hogyan kérdezgette végig a tudományos és technológiai közösségben a barátait arról, hogy mennyire hihetőek az általam ismertett jóslatok, és csalódottan vette tudomásul, mennyire közel állnak ezek a lehetőségek a megvalósuláshoz.

Joy cikke kizárólag a negatív forgatókönyvekre koncentrált, és nagy vihart kavart. A technológia világának egyik vezető alakja a jövő technológiájának fenyegető, új veszélyeit taglalta. Olyan volt ez, mint amikor Soros György, a befektetési guru kritikus megjegyzésekkel illette a korlátlan kapitalizmus túlzásait, bár a Joy cikke által kiváltott vita sokkal hevesebb volt. A *The New York Times* szerint

körülbelül tízezer cikk foglalkozott Joy írásával, több, mint technológiai témában bármivel, bármikor. Így a Lake Tahoe bárban végül is nem lazítottam, hanem két régi vita fonalát vettem fel újra, mivel John Searle-lel azóta is folytattuk a párbeszédet.

Annak ellenére, hogy Joy aggodalmát az én írásom váltotta ki, a „technológiai optimista” hírnevem sértetlen maradt, és számos fórumra meghívtak minket, hogy megvitassuk a jövő technológiájának lehetőségeit és veszélyeit. Noha tölem általában azt várják, hogy a lehetőségeket képviseljem a vitában, gyakran azzal megy el az időm nagy része, hogy Joy álláspontját védem a veszélyek valószínűsége kapcsán.

Sokan úgy értelmezték Joy cikkét, mint amely lemond a technológiai fejlődésről, ha nem is általában, hanem csak a „veszélyesekéről”, például a nanotechnológiáéről. Joy jelenleg kockázati tőkebefektetőként dolgozik a legendás szilícium-völgyi Kleiner, Perkins, Caufield & Byers cégnél, és olyan technológiákba fektet be, mint például a megújuló energiaforrások és egyéb természeti erőforrások területén alkalmazott nanotechnológia, és azt állítja, hogy félreértették az álláspontját. Nemrég magánlevelezésünk során azt mondta, hogy a hangsúlyt arra a felszólítására kellene helyezni, hogy „korlátozzuk a túl veszélyes technológiák fejlődését” (lásd az idézetet a fejezet elején), nem pedig a teljes lemondásra. Az önreplikáns nanotechnológiát illetően például tiltást javasol, hasonlóképpen a nanotechnológia két úttörője, Eric Drexler és Christine Peterson által alapított Foresight Intézet ajánlásához. Ez az ajánlás összességében teljesen ésszerű, bár úgy vélem, két kivételt tennie kellene, és később ki is térek rájuk.

Joy azt is javasolja, hogy ne tegyék közzé a neten a kórokozók génszekvenciáit, amivel szintén egyetértek. Azt szeretné, ha tudósok világszerte önként alkalmaznának bizonyos fokú szabályozást ezen elvek mentén, és rámutat, hogy „ha megvárjuk a katasztrófát, akkor azután sokkal súlyosabb és nagyobb kárt okozó szabályozást kell majd elfogadnunk”. Azt mondja, reméli, hogy „könnyen megalkotjuk majd ezt a szabályozást, hogy a lehető legtöbb előny megmaradjon”.

Mások, például Bill McKibben, aki környezetvédőként az elsők között figyelmeztetett a globális felmelegedésre, az egész területekről, mint a biotechnológiáról vagy a nanotechnológiáról való lemondást szorgalmazta, sőt akár mindenféle technológiáról. Ahogy azt lentebb részletesen tárgyalni fogom, a tág területekről való lemondást nem lehet megvalósítani anélkül, hogy gyakorlatilag ne mondanánk le minden technológiai fejlődésről. Ehhez viszont egy *Szép új világ*beli totalitárius kormányzatra lenne szükség, ami betilt mindenféle technológiai fejlődést. Ez a megoldás azonban nemcsak demokratikus értékeinknek mondana ellent, de még fokozná is a veszélyt azzal, hogy a föld alá üldözi a technológiát, ahol csak a legkevésbé felelősségteljes művelői (például a szakadár államok) rendelkeznének a szakértelem nagy részével.

Összefonódó előnyök...

„Derűs napok jártak, de viharosak is. Ez a Bölcsesség kora volt, de a Balgaságé is. A Hit korszaka volt ez, de a Hitetlenségé is. A Világosság napjai voltak ezek, de a Sötétségé is. A Remény tavasza virult, és a Kétségbeesés fergetege is dühöngött. Mindent reméltünk, és semmit sem reméltünk. A Mennyekbe mentünk egyenest, az ellenkező irányt is követtük.”

(Charles Dickens: Két város regénye, ford. Bálint Mihály)

„Olyan ez, mintha az ekéről vitatkoznánk. Tudjuk, hogy lesznek, akik ellene fognak

érvelni, de azt is tudjuk, hogy akkor is lesz eke.”

*(James Hughes, a Transzhumanista Szövetség titkára,
a Trinity College szociológusa a Válganak-e poszthumánna az
emberek? című vitában)*

A technológia mindig is kétélű áldás volt, ami egyfelől olyan előnyöket hozott nekünk, mint a hosszabb és egészségesebb élet, menekvés a testi és szellemi fáradozástól, és még sok más új, kreatív lehetőséget, másfelől viszont új veszélyeket is teremtett. A technológia a kreatív és destruktív vonásainkat egyaránt felerősíti.

A fajunk jelentős része már most tapasztalja az emberi történelmet végigkísérő szegénységtől, betegségektől és nehéz fizikai munkától való mentességet. Sokunknak megadatott a lehetőség, hogy kielégülést és értelmet találjon a munkájában, ne csak az igát húzza az életben maradásért. Soha nem látott eszközeink vannak az önkifejezésre. Most, hogy az internet elkezdett elterjedni a világ kevésbé fejlett részein is, óriási előrelépést fogunk látni a magas szintű oktatás és az orvosi ismeretek hozzáférhetőségében. Az egész világgal meg tudjuk osztani a kultúrát, a művészetet és az emberiség exponenciálisan növekvő tudásbázisát. A második fejezetben említettem a Világbank jelentését a szegénység világméretű csökkenéséről, és a következő fejezetben részletesebben is visszatérek rá.

A második világháború után mintegy húsz demokrácia létezett a világon, ma több mint száz, nagyrészt a decentralizált elektronikus kommunikációnak köszönhetően. A legnagyobb demokratizálódási hullám, a vasfüggöny lebontásával együtt, az 1990-es években játszódott le, párhuzamosan az internet és a kapcsolódó technológiák fejlődésével. Természetesen még nagyon sok tennivaló akad minden területen.

A biotechnológia a kezdeti fázisában van annak, hogy megfordítsa a betegségek és az öregedés folyamatait. A nanotechnológia és robotika két-három évtizeden belül mindenhol megjelenik, és exponenciálisan terjeszteni fogja az előnyeit. Ahogyan azt az előző fejezetekben áttekintettem, ezek a technológiák rendkívüli gazdagságot fognak teremteni, így legyőzik a szegénységet, és lehetővé teszik számunkra, hogy az összes materiális szükségletünket úgy elégítsük ki, hogy az olcsó nyersanyagokból és az információból tetszőleges termékeket állítunk elő.

Egyre több időt fogunk tölteni virtuális környezetekben, és bármilyen kívánt élményt képesek leszünk átélni bármilyen valós vagy virtuális személlyel a virtuális valóságban. A nanotechnológia hasonló módon fel fog ruházni minket azzal a képességgel, hogy szükségleteinknek és kívánságainknak megfelelően átformáljuk a fizikai világot. A kihalófélben lévő ipari korszak régi problémái megoldódnak. Vissza fogjuk fordítani a környezetrombolást. Nanotechnológiai alapokra épülő energiacellák és napelemek biztosítanak majd tiszta energiát. A fizikai testünkbe juttatott nanobotok elpusztítják a kórokozókat, eltávolítják a szemetet, például a hibás fehérjéket és rostokat, kijavítják a DNS-t, visszafordítják az öregedés folyamatát. Képesek leszünk testünk és agyunk összes rendszerét áttervezni, hogy sokkal tartósabbak és jobb képességűek legyenek.

A legjelentősebb a biológiai és nem biológiai intelligencia egybeolvadása lesz, bár hamar a nem biológiai intelligencia válik majd dominánssá. Hihetetlen mértékben kitágul majd annak a fogalma, hogy mit jelent embernek lenni. Nagymértékben fel fogjuk javítani képességünket mindenféle tudás, tudomány és művészet léterehozására, valamint befogadására, illetve a környezetünkhöz és másokhoz való viszonyulásunkra.

Másfelől...

„A valódi növényeket kiszorítják az akár csak a mai napelemek hatékonyságát elérő „levélzettel” rendelkező „növények”, nem ehető lombosítással telezsúfolva a bioszférát. Kemény mindenevő „baktériumok” győzik le a valódiakat: úgy terjednek majd, mint a szálló pollen, gyorsan szaporodnak, és napok alatt porrá redukálják a bioszférát. A veszélyes replikátorok könnyen túl erősek, túl parányiak és túl gyorsan terjedőek lehetnek ahhoz, hogy megállítsuk őket – legalábbis ha nem készülünk fel. Pedig még a vírusok és a gyümölcslegyek kordában tartásával is gondjaink vannak.”

(Eric Drexler)

Számos figyelemre méltó eredménye mellett a XX. században a technológia azt is megmutatta, hogy milyen mértékben képes felerősíteni romboló képességeinket, Sztálin tankjaitól kezdve Hitler vonataiig. A 2001. szeptember 11-i tragikus esemény egy másik példa arra, hogy mi történik, amikor pusztító szándékú emberek irányítják a technológiát (a repülőgépeket). És ma is annyi atomfegyver van a világon (nem is tudunk mindről), amennyi elég az összes biológiai élet elpusztításához a bolygón.

Az 1980-as évek óta egy egyszerű egyetemi biológiai laborban is megtalálhatók azok az eszközök és ismeretek, melyek révén az atomfegyvereknél is veszélyesebb, barátságtalan kórokozókat lehet létrehozni.^[680] Egy, a Johns Hopkins Egyetemen lefolytatott hadijáték-szimulációban, amely a „Sötét tél” elnevezést kapta, úgy becsülték, hogy a hagyományos himlő szándékos elterjesztése három amerikai városban körülbelül egymillió áldozattal járhat. Ha a vírust genetikailag módosítanák, hogy ellenálló legyen a jelenlegi vakcinákkal szemben, az eredmény sokkal rosszabb lenne.^[681] Ennek a kísérteties lehetőségnek a valódiságát egy ausztráliai kísérlet bizonyította be 2001-ben, amikor véletlenül olyan génekkel módosították az egérhimlő vírusát, amelyek megváltoztatták az immunrendszer reakcióját. Az egérvírus vakcinája tehetetlen volt a megváltoztatott vírussal szemben.^[682] Ezek a veszélyek a történelmi emlékeinket idézik meg. A bubópestis Európa népességének a harmadával végzett, 1918-ban pedig húszmillió áldozata volt az influenzának.^[683]

Vajon meg fogják gátolni ezek a veszélyek a komplex rendszerek (például az emberek és a technológiánk) erejének, hatékonyságának és intelligenciájának folyamatos gyorsulását? A komplexitás növekedése a bolygón egyenletes gyorsulást mutat, noha folyamatosan katasztrófák kísérték, belülről eredők és kívülről érkezőek egyaránt. Ez igaz a biológiai evolúciónkra is (ami olyan csapásokkal szembesült, mint az aszteroida- és meteorbecsapódások) és az emberi történelemre is (ami bizonyos szempontból egymást követő nagy háborúk sora).

Mindazonáltal úgy vélem, biztatást meríthetünk a világnak a SARS-vírusra (a súlyos akut légzőszervi szindrómára) adott reakciójából. Noha jelen sorok írása közben még nem zárható ki annak a lehetősége, hogy a SARS-vírusnak egy még virulensebb formája visszatér, úgy tűnik, a karanténintézkedések viszonylag sikeresek voltak, és megakadályozták, hogy a tragikus járvány világméretű katasztrófává eszkalálódjon. A reakció egy része ősrégi eszközöket, például karantént és maszkokat jelentett.

Mindazonáltal ez a megközelítés nem vált volna be azok nélkül a fejlett eszközök nélkül, amelyek csak a közelmúltban váltak elérhetővé. A kutatók a járvány kitörését követően harmincegy nap alatt szekvenálták a SARS-vírus DNS-ét – szemben a HIV felderítésének tizenöt évével. Ez lehetővé tette, hogy gyorsan hatékony teszteket fejlesszenek ki, és így hamar kiszűrjék a vírus hordozóit. Emellett a

globális kommunikációs hálózat is elősegítette, hogy világszerte összehangolt válaszlépéseket tegyenek, amire régebben nem volt lehetőség a járványok idején.

Ahogy a technológia a GNR teljes megvalósítása felé gyorsul, ugyanezeket az összefonódó potenciálokat fogjuk látni: a sokszorososan kiterjesztett emberi intelligencia eredményeként a kreativitás tobzódását, sok komoly, új veszéllyel párosulva. Az egyik nagy figyelmet kapott, valós veszély a nanobotok korlátlan replikációja. Ahhoz, hogy a nanobot-technológia hasznos legyen, több billió ilyen apró, intelligens eszközre van szükség. Ennek a mennyiségnek az eléréséhez muszáj lesz képessé tenni őket önmaguk lemásolására, gyakorlatilag ugyanazzal a módszerrel, ahogyan az a biológiai világban történik (ahogy a megtermékenyített petesejtből több billió sejt lesz az emberi testben). És ahogy a biológiai sejtosztódás is rossz irányt vehet (a rák esetében), ami akár halált is okozhat, a nanobotok önreplikációját vezérlő mechanizmus meghibásodása – az ún. szürkemassza-forgatókönyv – minden fizikai entitásra, biológaira és egyébre, veszélyt jelentene.

Az élőlények – köztük az emberek – lennének az elsődleges áldozatai az exponenciálisan terjedő nanobottámadásnak. A nanobottervezés a szén használja alapvető építőelemként. A szénmolekulák képesek láncokba, cikcakkba, gyűrűkbe, nanocsövekbe (cső alakot formázó hatszögekbe), lapokba, gömbökbe (gömb alakot formázó öt- és hatszögekbe) és számos egyéb alakzatba rendeződni. Mivel a biológia ugyanígy használja fel a szén, a hibásan működő nanobotok ideális alapanyagforrásnak fogják látni a Föld biomaszáját. A biológiai entitások energiát is tárolnak glükóz és ATP formájában.^[684] A biomaszában emellett hasznos nyomelemek is találhatóak, mint például oxigén, kén, vas, kalcium és egyébek.

Meddig tartana egy elszabadult, önreplikáló nanobotnak elpusztítani a Föld biomaszáját? A biomsza nagyságrendileg 10^{45} szénatomból áll.^[685] Egy darab önreplikáló nanobotban józan becslés szerint körülbelül 10^6 szénatom található. (Az elemzést nem befolyásolja érdemében az értékek pontossága, csak a hozzávetőleges nagyságrendjük.) Ennek a rosszindulatú nanobotnak tehát 10^{39} másolatot kellene készítenie magáról ahhoz, hogy feleméssze a biomaszát, ezt pedig 130 replikálással érheti el (melyek mindegyike megkétszerezi az elpusztított biomsza mennyiségét). Rob Freitas becslése szerint egy replikáció minimális időtartama körülbelül száz másodperc lenne, tehát 130 replikációs ciklushoz mintegy három és fél óra kellene.^[686] Ugyanakkor a pusztítás valódi sebessége kisebb lenne, mivel a biomsza nem „hatékonyan” van tárolva. A korlátozó tényező a pusztítás frontjának mozgása lenne. A nanobotok a kis méretük miatt nem képesek túl nagy sebességre. Valószínűleg hetekig is eltartana, míg körbeérnének a bolygón.

Ez alapján elképzelhetünk egy még rosszabb lehetőséget is. Egy két hullámból álló támadás során a nanobotok néhány hét alatt elterjednének a biomaszában, de a szénatomoknak csak egy jelentéktelen részét használnák fel, mondjuk minden billiárdból (10^{15}) egyet. Ilyen rendkívül alacsony koncentrációban a nanobotok gyakorlatilag észrevétlenek lennének. Aztán egy „optimális” pontot elérve következne a második hullám, amikor is a nanobotok helyben szaporodva villámgyorsan elpusztítanák a biomaszát. Minden egyes mag-nanobot egybilliárd másolatot hozna létre magáról. Ez tizenöt duplázódási ciklust venne igénybe, azaz körülbelül kilencven percig tartana. Mivel már elfoglalták helyüket a biomaszában, a pusztítás frontvonalának mozgása nem lenne többé korlátozó tényező.

A lényeg az, hogy védekezés nélkül a biomaszát igen gyorsan elpusztítaná a szürke massa. Mint később kitérek rá, szükségünk lenne egy nanotechnológiai immunrendszerre, mielőtt valós lehetőséggé válnak ezek a forgatókönyvek. Ennek az immunrendszernek képesnek kell lennie megállítani nemcsak a nyilvánvalóan pusztító, de a potenciálisan veszélyes (lopakodó) replikációt is, akár már nagyon kis koncentrációban.

Mike Treder és Chris Phoenix – a Felelős Nanotechnológiáért Központ ügyvezető igazgatója és igazgatója –, Eric Drexler, Robert Freitas, Ralph Merkle és mások felhívták a figyelmet arra, hogy a jövőbeli MNT-gyártóeszközöket meg lehet alkotni olyan biztonsági intézkedésekkel felvértezve, amelyek meggátolják az önreplikáns nanoeszközök létrehozását.^[687] Később részletesebben is kitérek ezekre a stratégiákra. Mindazonáltal ez a megállapítás, ha fontos is, nem úzi el a szürke massa kísértetét. Vannak egyéb, a gyártáson túlmutató okai is annak, hogy szükség lesz önreplikáló nanobotokra. Például az előbb említett nanotechnológiai immunrendszernek is végső soron szüksége lesz önreplikáló nanobotokra, hiszen másképp nem tudna megvédeni minket. Az önreplikálás képességére ahhoz is szükség lesz, hogy a nanobotok gyorsan kiterjesszék az intelligenciát a Földön túlra, ahogyan arról a hatodik fejezetben írtam. Valószínűleg katonai téren is széles körben alkalmazni fogják majd ezt a technikát. Mindemellett a nemkívánatos önreplikálás elleni óvintézkedéseket, például a későbbiekben bemutatásra kerülő szétszórt architektúrát az elszánt ellenségek vagy a terroristák kijátszhatják.

Freitas számos egyéb katasztrofális nanobot-forgatókönyvet is leírt.^[688] Az általa „szürke plankton” forgatókönyvnek nevezett esetben a nanobotok a víz alatt, CH₄ (metán) formájában tárolt, illetve a tengervízben feloldva található CO₂ formájában lévő szenet használnák fel. Az óceánban körülbelül tízszer annyi erőforrást találnának, mint a Föld biomasszájában. A „szürke por” forgatókönyv szerint a nanobotok a levegőben lévő porból és a napfényből szereznék energiát. A „szürke zuzmó” forgatókönyvben a sziklákból és kövekből nyernék ki a szenet.

Az egzisztenciális kockázatok

„Ha egy kis tudás veszélyes, hol az az ember, aki nincs veszélyben?”

(Thomas Henry)

Később (lásd a *A GNR-védelem programja* című részt a fejezet végén) írok még azokról a lépésekről, amiket ezekkel a súlyos kockázatokkal kapcsolatban tennünk kell, de semmilyen ma kitalált stratégiában nem lehetünk teljesen biztosak. Ezek a kockázatok, amelyeket Nick Bostrom „egzisztenciális kockázatoknak” nevez, a következő táblázat jobb felső negyedében található:^[689]

A kockázatok kategorizálása Bostrom szerint

		A kockázat foka	
		Mérsékelt	Komoly
Hatókör	Globális	Az ózonréteg elvékonyodása	<u>Egzisztenciális kockázatok</u>
	Helyi	Recesszió	Népirtás
	Személyes	Ellopott autó	Halál
		Túlélhető	Halálos

A földi biológiai élet a XX. század közepén, a hidrogénbomba feltalálása után, az atomhatalmak azt követő hidegháborúja során szembesült először ember teremtetten egzisztenciális kockázattal. Kennedy elnök állítólag 33 és 50 százalék közé tette egy totális nukleáris háború kitörésének az esélyét a kubai rakétaválság idején.^[690] A legendás matematikus, Neumann János, aki a Légierő Stratégiai Rakétaértékelő Bizottságának elnöke és a nukleáris stratégia kormányzati tanácsadója lett, közel száz százalékra becsülte a nukleáris Armageddon valószínűségét (még a kubai rakétaválság előtt).^[691] Az 1960-as évek kilátásait figyelembe véve melyik korabeli, tájékozott megfigyelő jósolta volna azt, hogy a világ átvészeli a következő negyven évet újabb, nem próbajellegű nukleáris robbantás nélkül?

A nemzetközi politika látszólagos káosza ellenére hálások lehetünk azért, hogy mindeddig sikerült elkerülni az atomfegyverek háborús alkalmazását. Azonban nyilvánvaló, hogy nem nyugodhatunk meg, hiszen még mindig létezik annyi hidrogénbomba, amennyivel többszörösen el lehetne pusztítani minden emberi életet.^[692] Noha ez manapság viszonylag kis közfigyelmet kap, az Egyesült Államok és Oroszország óriási interkontinentális ballisztikus rakétaarzenáljai még megvannak, a két nagyhatalom közötti viszony látszólagos enyhülése ellenére is.

A nukleáris fegyverek elszaporodása, a nukleáris anyagok és know-how elterjedése szintén aggodalomra ad okot, bár civilizációnk számára nem jelent egzisztenciális kockázatot. (Azaz csak egy teljes körű, az interkontinentális ballisztikus rakétákat is felölelő termonukleáris háború fenyeget a teljes emberiség kipusztulásával.) A nukleáris fegyverek elszaporodása és a nukleáris terrorizmus a *komoly, helyi kockázat* kategóriába tartozik, a népirtással együtt. Ugyanakkor az aggodalom súlyos és jogos, hiszen a kölcsönös elrettentés elvének logikája nem érvényes az öngyilkos terroristák vonatkozásában.

A közelmúltban még egy egzisztenciális kockázattal bővítettük a listát: a könnyen terjedő, genetikailag módosított vírusokéval, melyeknek hosszú a lappangási ideje és halálos kórt hordoznak. Vannak könnyen terjedő vírusok, mint az influenzáé és a hétköznapi nátháé. Vannak halálos vírusok, mint a HIV. Ritka, hogy egy vírusban mindkét tulajdonság egyszerre meglegyen. A ma élő emberek azoknak a leszármazottai, akik természetes ellenálló képességet fejlesztettek ki a nagyon fertőző vírusok többségével szemben. A faj képessége arra, hogy túlélje a vírusos járványokat, a szexuális úton történő szaporodás egyik előnye, ami genetikai sokszínűséget biztosít a populáción belül, s így nagyon sokféle reakció adható egy adott vírusra. Bár a bubópestis katasztrofális volt, nem végzett mindenki vel Európában. Más vírusok, mint például a himlő, rendelkeznek mindkét negatív jellemzővel – könnyen fertőznek és halálosak –, de már elég régóta jelen vannak ahhoz, hogy a társadalom technikai úton, védőoltással védekezzen ellenük. A génmódosítás viszont lehetőséget teremt ezeknek az evolúciós védelmeknek a megkerülésére azzal, hogy hirtelen új kórokozókat fejleszt ki, amelyekkel szemben sem természetes, sem technikai védelmünk nincs.

Az a lehetőség, hogy halálos mérgeket előállító géneket adjunk olyan könnyen terjedő, gyakori vírusokhoz, mint a közönséges nátha és az influenza, újabb egzisztenciális kockázattal fenyegető lehetőséget jelent. Ez a lehetőség vezette az Asilomar konferenciát annak az átgondolására, hogyan lehetne megbirkózni ezzel a fenyegetéssel, majd a biztonsági és etikai irányvonalak felvázolására. Noha ezek az irányvonalak mindeddig működtek, a génmanipuláció technológiája is egyre kifinomultabbá válik.

2003-ban a világ sikeresen megküzdött a SARS-vírussal. A SARS-járvány egy ősi gyakorlat (a kutatók arra gyanakodnak, hogy a vírus egzotikus állatokból, feltehetőleg cibetmacskákból került át a környezetükben élő emberekre) és egy modern gyakorlat (a fertőzés a légiközlekedés révén terjedt el

gyorsan a világban) kombinációjának eredményeként tört ki. A SARS lehetőséget biztosított arra, hogy kipróbáljuk magunkat egy, az emberi civilizáció számára új, erősen fertőző, az emberi testen kívül is sokáig megmaradó, és súlyos, 14–20%-osra becsült halálozási arányú betegséget okozó vírussal szemben. A reakciónk ősi és modern technikákat kombinált.

A SARS-sal szerzett tapasztalataink azt mutatják, hogy a legtöbb vírus, még ha viszonylag gyorsan terjed és elég veszélyes is, komoly, de nem feltétlenül egzisztenciális kockázatot jelent. Mindazonáltal úgy tűnik, a SARS nem génmódosított vírus. Könnyen terjed testnedvekkel, de jóval nehezebben a levegőben. Lappangási ideje egy naptól két hétig terjed, míg a hosszabb lappangási időszak lehetővé tenné, hogy több, exponenciálisan növekvő nemzedéke is létrejöjjön, mielőtt még a hordozókat azonosítanánk.^[693]

A SARS halálos, de az áldozatai többsége életben maradt. Továbbra is lehetséges rosszindulatúan módosítani egy vírust úgy, hogy könnyebben terjedjen, mint a SARS, hosszabb legyen a lappangási ideje, és lényegében az összes áldozat számára halált jelentsen. A himlő közel áll ahhoz, hogy mindez jellemző legyen rá. Noha van ellene vakcinánk (bár elég durva), a vírus genetikailag módosított változatai ellen nem lenne hatásos.

Amint azt később kifejtem, a genetikailag módosított, rosszindulatú vírusok ablaka a 2020-as években fog bezáródni, amikor rendelkezésünkre állnak majd a nanobotalapú, teljes mértékben hatékony antivírus-technológiák.^[694] Mindazonáltal, mivel a nanotechnológia több ezerszer erősebb, gyorsabb és intelligensebb lesz, mint a biológiai entitások, az önreplikáló nanobotok sokkal nagyobb veszélyt és újabb egzisztenciális kockázatot fognak jelenteni. A rosszindulatú nanobotok ablakát végül az erős mesterséges intelligencia fogja bezárni, de nem meglepő módon a „nem barátságos” MI még nagyobb egzisztenciális veszélyt fog jelenteni, ahogyan arra később kitérek.

Az óvatosságelv. Ahogyan arra Bostrom, Freitas és más megfigyelők, köztük én is, rámutattak, az egzisztenciális kockázatok esetében nem támaszkodhatunk a próba és elvetés módszerére. Az „óvatosságelvként” ismertté vált elvnek több, egymással versengő értelmezése létezik. (Ha egy tett következményei nem ismertek, de egyes tudósok szerint akár csak a minimális kockázata is fennáll annak, hogy kifejezetten negatívak, akkor jobb nem végrehajtani a tettet, mint megkockáztatni a negatív következményeket.) Azonban egyértelmű, hogy a lehető legbiztosabbnak kell lennünk a stratégiánkban, amivel szembeszállunk az ilyen kockázatokkal. Ezért hallunk egyre erőteljesebb hangokat, amelyek azt követelik, hogy még megjelenésük előtt akadályozzuk meg az egzisztenciális kockázatok úgy, hogy alapvető stratégiaként leállítjuk a technológia továbbfejlesztését. A korlátozás azonban nem a megfelelő reakció, és csak a megszülető technológiák jótékony hatásait zavarná meg, miközben valójában növelné a katasztrofális következmények valószínűségét. Max More jól megfogalmazza az óvatosságelvet, és azt javasolja, hogy váltsuk fel az általa „proaktív elvnek” nevezett stratégiával, mely mérlegeli a cselekvés és nem cselekvés kockázatait is.^[695]

Mielőtt rátérnék arra, hogyan reagáljunk az egzisztenciális kockázatokra, érdemes áttekinteni még Bostrom és mások néhány másik forgatókönyvét is.

Minél kisebb a kölcsönhatás, annál nagyobb a robbanási potenciál. A közelmúltban vita alakult ki a jövőbeli, nagy energiájú részecskegyorsítók azon képessége kapcsán, hogy szubatomi szinten transzformált energiaállapotok láncreakcióját indíthatják el. Ennek eredményeként a folyamat egyre növekedve széttépne minden atomot galaktikus környezetünkben. Több ilyen forgatókönyv is született, köztük azzal a lehetőséggel, hogy létrehozunk egy fekete lyukat, amely elnyeli a naprendszerünket.

Ezeknek a forgatókönyveknek az elemzése azt mutatja, hogy igen kicsi a valószínűsége a bekövetkezésüknek, bár nem minden fizikus derűlátó a veszélyeket illetően.^[696] Ezeknek az elemzéseknek a matematikája megalapozottnak tűnik, de nincs még konszenzus a fizikai valóságnak ezt a szintjét leíró képleteket illetően. Ha az ilyen veszélyek túlzásnak tűnnek, gondoljunk arra, hogy valóban egyre kisebb méretskálákon egyre nagyobb energiájú jelenségeket találtunk!

Alfred Nobel molekulák kémiai kölcsönhatását próbálgatva fedezte fel a dinamitot. Az atombomba, amely több tízezerszer erősebb a dinamitnál, nagy atomok nukleáris kölcsönhatásain alapul, amelyek sokkal kisebb alkotórészei az anyagnak, mint a molekulák. Az atombombánál több tízezerszer erősebb hidrogénbomba még kisebb léptéken működik: kis atomokkal. Noha ebből a felismerésből nem feltétlenül következik, hogy léteznek még erősebb destruktív láncreakciók a szubatomi részecskék szintjén, legalábbis elképzelhetővé teszi a következtetést.

Nekem személy szerint az a véleményem a veszélyről, hogy nem valószínű, hogy pusztán a véletlen révén találkozunk ilyen pusztító eseménnyel. Gondoljunk bele, mennyire valószínűtlen lenne véletlenül létrehozni egy atombombát! Egy ilyen eszközhöz az anyagok és cselekedetek pontos összehangolása szükséges, mint ahogy az első atombomba megépítése is kiterjedt és precíz tervezést igényelt. Még kevésbé valószínű, hogy véletlenül létrehozzunk egy hidrogénbombát, hiszen ehhez előbb egy atombombát kellene készíteni, hidrogénmaggal és egyéb elemekkel kiegészítve. Az pedig még valószínűtlenebbnek tűnik, hogy belebotoljunk éppen azokba a körülményekbe, amelyek ahhoz kellene, hogy szubatomi szinten induljon el egy újfajta, katasztrofális láncreakció. Ugyanakkor az elképzelhető következmények kellően pusztítóak ahhoz, hogy az óvatosságelv alapján komolyan vegyük ezeket a lehetőségeket. A különböző forgatókönyveket gondosan elemezni kell, mielőtt újfajta kísérleteket hajtanánk végre a gyorsítókka. Ugyanakkor ez a kockázat nem szerepel a XXI. század veszélyeiről vezetett listám első helyein.

Kikapcsolják a szimulációnkat. Egy másik egzisztenciális kockázat, amit Bostrom és mások azonosítottak, az, hogy valójában egy szimulációban élünk, és ezt a szimulációt ki fogják kapcsolni. Úgy tűnhet, hogy nem sok mindent tehetünk ez ellen. Mivel mi vagyunk a szimuláció tárgyai, nincs lehetőségünk befolyásolni, hogy mi történjék benne. A legjobb módszer a kikapcsolás elkerülésére az, ha igyekszünk érdekesek lenni a szimuláció megfigyelői számára. Feltételezve, hogy valaki valóban figyeli a szimulációt, jogosnak tűnik az a feltételezés, hogy kisebb valószínűséggel kapcsolja ki, ha az leköti a figyelmét.

Rengeteget töprenghetnénk azon, mitől érdekes egy szimuláció, de az új tudás létrehozása kétségkívül kritikus része lenne. Noha nehezen lehetne kikövetkeztetni, mit talál érdekesnek hipotetikus megfigyelőnk, a szingularitás minden bizonnyal lenne olyan magával ragadó, mint bármi más, amit el tudunk képzelni, és rendkívüli sebességgel teremtené új tudást is. Sőt, talán épp a tudás robbanásszerű növekedését elhozó szingularitás elérése a szimuláció célja. Így a „konstruktív” szingularitás (olyan, ami elkerüli a degeneratív végeredményeket, mint az emberi létet elpusztító szürke masszát vagy egy rosszindulatú MI uralmát) létrehozása lehet a legjobb módszer a szimuláció kikapcsolásának az elkerülésére. Természetesen sok egyéb ok is a konstruktív szingularitás elérése mellett szól.

Ha a világ, amelyben élünk, szimuláció valaki számítógépén, akkor nagyon tökéletes szimuláció – ami azt illeti, annyira részletes, hogy akár el is fogadhatjuk a valóságunknak. Akárhogy is, ez az egyetlen valóság, amelyhez hozzáférésünk van.

Úgy tűnik, a világunk hosszú és gazdag történettel bír. Ez vagy azt jelenti, hogy valójában nem

szimuláció, vagy azt, hogy a szimuláció már nagyon régóta fut, és így valószínűleg nem fog leállni a közeljövőben sem. Persze az is lehetséges, hogy a szimuláció arra is kiterjed, hogy anélkül mutassa fel a hosszú múlt nyomait, hogy az valóban megtörtént volna.

Ahogy azt a hatodik fejezetben tárgyaltam, léteznek következtetések, melyek szerint egy fejlett civilizáció új világegyetemet teremthet a számítások végrehajtására (vagy másképp fogalmazva, folytathatja saját számítástechnikája kiterjesztését). Azt, hogy mi esetleg egy ilyen, másik civilizáció által teremtett világegyetemben élünk, tekinthetjük szimulációnak. Lehet, hogy ez a másik civilizáció egy evolúciós algoritmust futtat a mi világegyetemünkön (azaz az evolúciót, amelynek a szemtanúi vagyunk), hogy létrehozza a technológiai szingularitás nyomán keletkező tudásrobbanást. Ha ez igaz, akkor a mi világegyetemünket figyelő civilizáció kikapcsolhatja a szimulációt, amint úgy tűnik, hogy a tudás szingularitása megghiúsult, és nem fog megvalósulni.

Ez a forgatókönyv sem szerepel előkelő helyen az aggodalmaim listáján, különösen azért, mert az egyetlen stratégiánk a negatív kimenetel elkerülésére az, amit egyébként is követnünk kell.

A buli tönkretétele. Egy másik gyakran hangoztatott aggodalom egy hatalmas aszteroida- vagy meteorbecsapódás, ami már többször megtörtént a Föld története során, és valóban egzisztenciális kockázatot jelentett az akkor élő fajok számára. Ez természetesen nem technológiai veszély. Sőt a technológia fog megvédeni minket tőle (egy-két évtizeden belül). Noha kisebb becsapódások rendszeresen előfordulnak, a nagy és pusztító űrbéli látogatók ritkák. Egyet sem látunk közelegni, és gyakorlatilag biztos, hogy mire ez a veszély felmerül, a civilizációnk képes lesz megsemmisíteni a betolakodót, mielőtt az semmisítene meg bennünket.

Az egzisztenciális veszélyek listájának a következő eleme az, hogy egy idegen intelligencia pusztít el minket (nem az, amelyiket mi fogunk megteremteni). Erre a lehetőségre már kitértem a hatodik fejezetben, és ezt sem tartom valószínűnek.

GNR: a lehetőségek és a veszélyek. Ezek után nem marad más, mint a GNR-technológiák mint elsőszámú aggodalomforrások. Mindazonáltal úgy gondolom, komolyan kell vennünk a félrevezetett és egyre hangosabb luddita hangokat is, melyek a technológiai fejlődésről való széles körű lemondást hirdetik, hogy elkerüljük a GNR valódi veszélyeit. Később tárgyalandó okokból kifolyólag nem a lemondás a válasz, ám a racionális félelem irracionális megoldásokhoz vezethet. Az emberi szenvedés megszüntetésének késlekedése még ma is súlyos következményekkel jár – például az éhínség súlyosbodásával Afrikában, mivel nem fogadják a genetikailag módosított növényekből származó élelmiszersegélyeket.

A széles körű lemondás alkalmazásához totalitáriánus rendszer kellene, de a totalitáriánus szép új világ mind valószínűtlenebb az egyre erősebb, decentralizált elektronikus és fotonikus kommunikáció demokratizáló hatása miatt. Az internet és a mobiltelefonok által képviselt világméretű, decentralizált kommunikáció átható demokratizáló erőként működik. Nem a tankon álló Borisz Jelcin fordította meg a Mihail Gorbacsov elleni államcsíny, hanem a faxok, fénymásolók, videokamerák és személyi számítógépek titkos hálózata, amely megtörte az információ több évtizedes totalitáriánus ellenőrzését.^[697] A demokrácia és a kapitalizmus felé való elmozdulást, és az ezzel járó gazdasági fejlődést, ami az 1990-es éveket jellemezte, mind a személyes kommunikációs technológiák egyre növekvő ereje táplálta.

Léteznek még egyéb, nem egzisztenciális, de azért komoly kérdések: „Ki irányítja a nanobotokat?”, „Kihez beszélnek a nanobotok?” A jövőbeli szervezetek (a kormányok vagy a szélsőséges csoportok),

vagy csak egy okos ember több billió észrevehetetlen nanobotot tehet a vízbe vagy az élelmiszerbe, úgy egy adott személyébe, mint egy egész országéba. Ezek a kémbotok utána figyelemmel kísérhetik, befolyásolhatják, sőt egyenesen irányíthatják a gondolatokat és a tetteket. Mindemellett a létező nanobotokra hatással lehetnek szoftvervírusok és hacker-technológiák is. Amikor egy szoftver fut a testünkben és az agyunkban (mely küszöböt néhány ember esetében már átléptük), a magánélet és a biztonság problémái sokkal fontosabbakká válnak, és ki fognak alakulni az ilyen behatolásokat gátló módszerek.

Az átalakuló jövő elkerülhetetlensége. A különböző GNR-technológiák több fronton is fejlődnek. A GNR teljes megvalósítása több száz kicsi, önmagában jótékony hatású lépés eredménye lesz. A „G” esetében már átléptük a dizájner kórokozók létrehozásához szükséges eszközök jelentette küszöböt. A biotechnológia fejlődése tovább fog gyorsulni, azokból az etikai és gazdasági előnyökből táplálkozva, amelyek a biológia mögött rejlő információs folyamatok megismeréséből származnak.

A nanotechnológia mindenféle technológia folyamatos miniaturizálásának az elkerülhetetlen végeredménye. Számos alkalmazási területen, például az elektronika, a mechanika és az orvostudomány terén a legfontosabb jellemzők körülbelül negyedükre csökkennek évtizedenként és lineáris dimenzióként. Emellett egyre gyorsul a nanotechnológiát és a lehetséges alkalmazásait kutató tudományok fejlődése. (Lásd a *Nanotechnológiával kapcsolatos szabadalmak az Egyesült Államokban* című ábrát a második fejezetben.)

Hasonlóképpen, az emberi agy visszafejtésére irányuló erőfeszítéseinket a számos várt előny hajtja, köztük a kognitív betegségek megértése és gyógyítása. Az agyba való bepillantást szolgáló eszközök exponenciális ütemben fejlődnek a tér- és időbeli felbontásuk tekintetében, és már bebizonyítottuk, hogy az agyi képalakító módszerekkel és az agy tanulmányozásával szerzett adatokat át tudjuk vinni működő modellekbe és szimulációkba.

Az agy visszafejtésére irányuló erőfeszítésekből származó ismeretek, az MI-algoritmusok kutatása és a számítástechnikai platformok teljesítményének exponenciális növekedése elkerülhetetlenné teszi az erős MI (az emberi szintű és azon túli MI) létrejöttét. Amint az MI eléri az emberi szintet, szükségképpen meg is fogja haladni azt, mivel kombinálni fogja az emberi intelligencia erősségeit a már most létező nem biológiai intelligencia sebességével, memóriájával, számítási teljesítményével és tudásmegosztó képességével. A biológiai intelligenciával szemben a nem biológiai intelligencia léptékét, teljesítményét és ár–teljesítmény-arányát tekintve exponenciálisan tovább fog növekedni.

Totalitáriánus lemondás. Az egyre gyorsuló fejlődést mindezekben a frontokon csak egyetlen elképzelhető módon lehet megállítani: egy világméretű totalitáriánus rendszer révén, amely teljes mértékben lemond a fejlődés eszméjéről. Ám valószínűleg még ez a kísérlet is kudarcot vallana a GNR veszélyeinek elhárításában, mivel a kialakuló földalatti tevékenység a GNR pusztító alkalmazásait helyezné előtérbe. Ennek az lenne az oka, hogy felelősségteljes tudósok és kutatók, akikre a védekező technológiák kifejlesztésében számítanánk, nem férnének hozzá a szükséges eszközökhöz. Szerencsére egy ilyen totalitáriánus világ kialakulásának az esélye egyre kisebb, ugyanis a tudás egyre nagyobb decentralizációja eredendően demokratizáló erő.

A védelem előkészítése

Én magam arra számítok, hogy az említett technológiáknak a kreatív és konstruktív alkalmazásai

lesznek a dominánsak, mint ahogy szerintem ma is ez a helyzet. Mindazonáltal óriási mértékben meg kell növelnünk a specifikus védekező technológiákra fordított befektetéseinket. Mint korábban tárgyaltam, ma a biotechnológia kritikus fázisába léptünk, és a XXI. század tízes éveinek a végén el fogjuk érni azt a fázist, ahol közvetlenül alkalmaznunk kell majd a nanotechnológiai védekező technológiákat.

Nem kell a holnapon túl néznünk ahhoz, hogy lássuk a technológiai fejlődés ígéreteit és veszélyeit. Képzeljük el, hogyan beszélénk a ma létező veszélyekről (például az atom- és hidrogénbombáról) valakinek, aki néhány száz évvel ezelőtt élt! Őrültnek tartana minket, hogy ilyen kockázatot vállalunk. De vajon hányan akarnánk 2005-ből visszatérni ahhoz a rövid, állatias, betegségektől és szegénységtől sújtott, katasztrófákkal teli élethez, amelyet az emberi faj 99%-a élt néhány száz évvel ezelőtt?^[698]

Romanticizálhatjuk a múltat, de egészen a közelmúltig az emberiség nagy része rendkívül törekeny életet élt, amelynek során egyetlen – gyakran bekövetkező – sorscsapás igazi katasztrófát jelenthetett. Kétszáz évvel ezelőtt a nők várható élettartama a rekordot tartó országban (Svédországban) nagyjából harmincöt év volt, azaz nagyon rövid a ma várható élettartamhoz képest – ami a japán nők esetében például nyolcvanöt év. A férfiak várható élettartama hozzávetőleg harminchárom év volt, szemben a jelenlegi rekordot tartó országokra jellemző hetvenkilenc évvel.^[699] Fél napig tartott a vacsora elkészítése, és a legtöbb emberi tevékenységet a kemény fizikai munka jellemezte. Nem volt szociális védőháló. Fajunk egy jelentős része még mindig ilyen körülmények között él, ami legalábbis egy nyomós érv a technológiai fejlődés és a vele járó gazdasági gyarapodás mellett. Csak a képességeiben és hozzáférhetőségében több nagyságrendnyi fejlődésre alkalmas technológia lehet képes megküzdeni az olyan problémákkal, mint a szegénység, a betegségek, a környezetszennyezés és napjaink társadalmának többi nehézsége.

Az emberek viselkedése gyakran három fázison megy át, miközben a jövő technológiájának hatásairól gondolkodnak: áhitattal és csodálattal képzelik el a régi problémák megoldására való képességét; aztán megijednek az új technológiák új, komoly veszélyeitől; végül pedig rájönnek, hogy az az egyetlen járható és felelősségteljes út, ha gondosan kijelölik a fejlődés olyan pályáját, amely megvalósítja a jótékony hatásokat és közben kordában tartja a veszélyeket.

Mondanom sem kell, hogy már megtapasztaltuk a technológia árnyoldalait – például a háborúk pusztítását és rombolását. Az első ipari forradalom durva technológiái sok fajt kipusztítottak a bolygónkon. Centralizált technológiáink (mint az épületek, városok, repülőgépek és erőművek) bizonyítottan nem biztonságosak.

A nukleáris, biológiai és vegyi hadviselés technológiáit mind bevetették a múltban, vagy fenyegetőztek a bevetésükkel.^[700] A sokkal erősebb GNR-technológiák új, komoly helyi és egzisztenciális kockázatokkal fenyegetnek. Ha sikerül túllépnünk a genetikailag módosított, „tervezett” kórokozók miatti félelmeken, majd a nanotechnológia önreplikáló entitásai miattiakon, szemben találjuk magunkat a robotokkal, amelyek intelligenciája fel fogja venni a versenyt a miénkkel, és végül le is fogja győzni azt. Ezek a robotok remek segítők lehetnek, de ki a megmondhatója, hogy örökké barátságosak maradnak az egyszerű biológiai emberekkel?

Erős MI. Az erős MI azt az ígéretet hordozza magában, hogy továbbviszi az emberi civilizáció exponenciális fejlődését. (Mint korábban tárgyaltam, az emberi civilizációból származó nem biológiai intelligenciát is emberinek tartom.) Ám a veszélyei is komolyak, éppen az intelligenciája miatt. Az intelligenciát eredendően lehetetlen kontrollálni, így a nanotechnológia kordában tartására

kidolgozott különböző stratégiák (például a lentebb ismertetésre kerülő „szétszórt architektúra”) nem fognak működni az erős MI-vel szemben. Voltak viták és javaslatok arra, hogy irányítsuk az MI-fejlesztést az Eliezer Yudkowski által „barátságos MI-nek” ^{701} nevezett dolog felé (lásd a *Védelem a „barátságtalan” erős MI-vel szemben* című részt). Az ilyen javaslatok hasznosak a vita szempontjából, de ma egyszerűen lehetetlen olyan stratégiákat kidolgozni, amelyek teljes mértékben biztosítják, hogy a jövőbeli MI-k emberi erkölcsöket és értékeket testesítsenek meg.

Visszatérés a múltba? Bill Joy az esszéjében és az előadásában ékesszólóan lefesti az elmúlt századok járványait, és bemutatja azt, hogyan hozhatnak vissza rég elfeledett betegségeket az új önreplikáló technológiák, például a mutáns génmódosított kórokozók és az elszabadult nanobotok. Joy elismeri, hogy a technológiai fejlődés, például az antibiotikumok és a higiénia fejlődése megszabadított minket az ilyen járványok rémétől, s ezért a technológia ilyen konstruktív alkalmazását tovább kell vinni. A világban létezik még szenvedés, és ez a legnagyobb odafigyelést követeli meg tőlünk. Mondjuk azt több millió rákos, vagy más halálos betegségben szenvedő embernek, hogy leállítjuk mindenféle génmódosított kezelés fejlesztését, mert fennáll a veszélye, hogy ezeket a technológiákat egy nap majd rossz célra használják fel? Bár ez költői kérdés, tisztában vagyok azzal, hogy létezik egy mozgalom, amelyik pontosan ezt akarja, de a legtöbb ember egyetértene azzal, hogy nem egy ilyen széles körű lemondás a válasz.

Az emberi szenvedés enyhítésének lehetősége a technológiai fejlődés egyik kulcsfontosságú motiváló ereje. Szintén vonzóak azok a már most látható gazdasági előnyök, amelyek egyre halmozódni fognak az elkövetkező évtizedekben. A sok összefonódott technológia gyorsuló fejlődése arannyal kikövezett utakat teremt. (Többes számban mondom, mert a technológiai fejlődés nyilvánvalóan nem egyetlen ösvényen vezet előre.) Egy kompetitív környezetben gazdasági imperatívusz rálépni ezekre az utakra. A technológiai fejlesztésről való lemondás öngyilkosság lenne az egyének, a vállalatok és az országok számára.

A lemondás eszméje

„A nagy civilizációs előrelépések szinte tönkreteszik azt a civilizációt, amelyben megtörténnek.”

(Alfred North Whitehead)

Ezzel eljutottunk a lemondás problémájáig, amely a legvitatottabb javaslat a lemondás hirdetői, például Bill McKibben részéről. Érzem én, hogy a megfelelő szintű lemondás része a jövőben ránk váró valódi veszélyekre adott felelős és konstruktív válasznak, a kérdés csak az, hogy pontosan milyen szinten kellene lemondanunk a technológiáról?

Ted Kaczynski, aki Unabomberként híresült el a világban, az egésztől lemondana. ^{702} Ez se nem kívánatos, se nem kivitelezhető, és az álláspont tarthatatlanságát csak kiemeli Kaczynski elítélendő taktikájának értelmetlen mivolta.

Azonban más, a Kaczynskiénél megfontoltabb hangok is a technológia széles körű korlátozása mellett érvelnek. McKibben szerint már így is mindenre elegendő a technológiánk, és véget kellene vetni a további fejlődésnek. A legújabb könyvében, az *Enough: Staying Human in an Engineered Age*-ben (*Elég: embernek maradni egy elgépiesedett világban*) átvitt értelemben a sörhöz hasonlítja a technológiát: „Egy sör jó, kettő még jobb, de nyolcat szinte biztos, hogy megbánunk.” ^{703} Ez a

metafora elsiklik a dolog lényege fölött, és nem vesz tudomást az emberi világban létező szenvedésről, amit a tudományos fejlődésnek köszönhetően enyhíteni tudunk.

Noha az új technológiákat, mint bármi mást, időnként túlzásokba esve is lehet használni, az ígéretük nem merül ki annyiban, hogy az embereknek lesz egy negyedik mobiltelefonja is, vagy kétszer annyi kéretlen e-mailt kapnak. Azt jelenti, hogy tökéletesednek a rák és egyéb halálos betegségek elleni eszközeink, az általános jólét növekedése legyőzi a szegénységet, a természet megtisztul az első ipari forradalom hatásaitól (mely célt McKibben is hangsúlyozza), és megoldódik sok más régi probléma.

Széles körű lemondás. A lemondás egy másik szintje az lenne, ha csak bizonyos, túl veszélyesnek ítélt területekről vonulnánk ki – például a nanotechnológiából. Ám az ilyen nagy ívű önkorlátozás sem kivitelezhető. Mint fentebb rámutattam, a nanotechnológia egyszerűen a mindenféle technológiát átható miniaturizálási törekvések makacs trendjének elkerülhetetlen végeredménye. Nem egyetlen centralizált törekvés, hanem miriádnyi projekt foglalkozik vele számtalan különböző céllal.

Az egyik megfigyelő így írt:

„Még egy ok arra, hogy az ipari társadalmat nem lehet megreformálni... az, hogy a modern technológia egy egységes rendszer, amelyben minden rész függ a többitől. Nem dobhatjuk ki a technológia „rossz” részeit, csak a „jókat” megtartva. Vegyük például a modern orvostudományt! Az orvostudomány fejlődése a fizika, a kémia, a biológia, a számítástechnika és még sok más tudományterület fejlődésétől függ. A fejlett orvosi kezelésekhez drága high-tech felszerelések kellenek, amelyek csak a technológiai szempontból fejlett, gazdasági szempontból tehetős társadalmakban megfizethetőek. Nyilvánvaló, hogy az orvostudomány nem fejlődhet a teljes technológiai rendszer és annak minden tartozéka nélkül.”

A megfigyelő, akit idéztem, ismét csak Ted Kaczynski.^{[17041](#)} Noha joggal utasíthatja el bárki Kaczynskit, mint tekintélyt, azt hiszem, az előnyök és kockázatok mélyen összefonódott jellegét illetően igaza van. A két dolog viszonylagos egyensúlya kapcsán azonban egyértelműen más a véleményünk. Bill Joyjal hosszú párbeszédet folytattunk erről a problémáról, nyilvánosan és magánjellegűen is, és mindketten úgy véljük, hogy a technológiának fejlődnie kell és fejlődni is fog, ugyanakkor aktívan foglalkoznunk kell a sötét oldalával. A legnagyobb kihívás a lemondás azon szintjének a megtalálása, ami kívánatos, egyben kivitelezhető.

Finomhangolt lemondás. Úgy gondolom, hogy a megfelelő szintű lemondásnak helyet kell kapnia a XXI. századi technológiák veszélyeire adott etikai válaszunkban. Konstruktív példa erre a Foresight Intézet által javasolt etikai útmutatás: nevezetesen az, hogy a nanotechnológusok lemondanak azoknak a fizikai entitásoknak a fejlesztéséről, melyek a természeti környezetben képesek önreplikációra.^{[17051](#)} Véleményem szerint két kivétel létezik e szabály alól. Először is, előbb-utóbb létre kell hoznunk a nanotechnológia-alapú bolygósintű immunrendszert (a természeti környezetbe beágyazódott nanobotokat, melyek megvédenek minket az elszabadult, önreplikáló nanobotoktól). Robert Freitaszal sokat beszélgettünk arról, hogy ennek az immunrendszernek vajon önreplikálnak kell-e lennie. Freitas így ír: „Az előre elhelyezett erőforrásokkal – úgymint a konkrét fenyegetésekre válaszul nagy mennyiségű, nem önreplikáló védőt előállítani képes, nagy teljesítményű, nem önreplikáló nanogyárakkal – kiegészített, átfogó megfigyelőrendszernek elegendőnek kell

lennie.”^[706] Egyetérttek Freitasszal abban, hogy a kezdeti időszakban elégséges lehet az előre elhelyezett immunrendszer, amely képes megerősíteni a védőket. Ám én arra számítok, hogy amint az erős MI egybeolvad a nanotechnológiával, és a nanomódosított entitások ökológiája sokszínűvé és komplexsé válik, a védekező nanobotoknak is szükségük lesz arra a képességre, hogy saját maguk gyorsan replikálódhassanak. A másik kivétel a naprendszerünkön kívüli bolygórendszerek felderítésére bevetett, önreplikáló nanobotokon alapuló szondák iránti igény.

A hasznos etikai vezérelvek egy másik kitűnő példája azoknak az önreplikáló fizikai entitásoknak a betiltása, amelyek tartalmazzák az önreplikáláshoz szükséges saját kódjukat. A Ralph Merkle nanotechnológus által „szétszórt architektúrának” nevezett rendszerben az ilyen entitásoknak egy központi biztonságos szerverről kellene beszerezniük ezt a kódot, ami elejét vehetné a nemkívánatos replikációnak.^[707] A szétszórt architektúra lehetetlen a biológiai világban, tehát van legalább egy mód arra, hogy a nanotechnológiát biztonságosabbá tegyük, mint a biotechnológiát. Más szempontokból a nanotechnológia potenciálisan sokkal veszélyesebb, mivel a nanobotok fizikailag erősebbek és intelligensebbek lehetnek, mint a fehérjealapú entitások.

Ahogy az ötödik fejezetben leírtam, a nanotechnológia-alapú szétszórt architektúrát alkalmazhatjuk a biológiai létezőkre is. Egy nanoszámítógép feljavíthatja vagy kicserélheti minden sejt magját, és megadhatja a DNS-kódokat. Egy a riboszómához (a sejtmagon kívüli mRNS-ben lévő bázispárokat értelmező sejtszervecskéhez) hasonló molekuláris mechanizmussal felszerelt nanobot veszi a kódokat és létrehozza az aminosavláncokat. Mivel a nanoszámítógépeket vezeték nélküli kapcsolaton keresztül is tudjuk majd irányítani, képesek leszünk meggátolni a nemkívánatos replikációt, s így elejét vehetjük a ráknak. Létrehozhatunk speciális, a betegség ellen szükséges fehérjét. Kijavíthatunk a DNS-hibákat, és feljavíthatjuk a DNS-kódot. A szétszórt architektúra erősségeiről és gyengeségeiről a későbbiekben írok.

A visszaélések kezelése. A széles körű lemondás ellentmond a gazdasági fejlődésnek és etikailag sem igazolható, tekintettel a betegségek, a szegénység és a környezetszennyezés megszüntetésének lehetőségére. Mint fentebb említettem, a tiltás csak fokozná a veszélyeket. A biztonság érdekében hozott szabályok alkalmazása – lényegében a finomhangolt lemondás – a helyes megoldás.

Ugyanakkor a szabályozás folyamatát is fel kell gyorsítanunk. Jelenleg az Egyesült Államokban az új egészségügyi technológiák öt-tíz éves késedelmet szenvednek az FDA jóváhagyási eljárása miatt (és más országokban is hasonló a helyzet). A potenciálisan életmentő kezelések visszatartásával okozott kár (például a szívbetegségek kezeléseinek késleltetése miatt évente egymillióan halnak meg az Egyesült Államokban) nagyon kis súllyal esik latba az új terápiák lehetséges kockázataival szemben.

A további óvintézkedések között szerepelnie kell az ellenőrző testületek felállításának, a technológiaszpecifikus „immunreakciók” megtervezésének, és a hatóságok által végzett, számítógépekkel támogatott megfigyelésnek. Sokan nem tudják, hogy a hírszerző szervezeteink már ma olyan fejlett technológiákat használnak, mint például az automatikus kulcsszókeresés a telefonos, műholdas és internetes kommunikáció megfigyelése során. Az idő múlásával komoly kihívást fog jelenteni a magánélethez való jog megőrzése és a XXI. századi technológiák rosszindulatú felhasználása elleni védelem közötti egyensúlyozás. Ez az egyik oka az olyan vitáknak, amelyek a titkosítási módszerek „hátsó ajtaja” (melyen keresztül a hatóságok hozzáférhetnek egyébként zárolt információkhoz), vagy az FBI Carnivore nevű e-mail-figyelő rendszere kapcsán robbantak ki.^[708]

Esettanulmányként talán megnyugvást találhatunk abban, ahogyan a közelmúltban megbirkóztunk

egy technológiai kihívással. Létezik ma egy teljes mértékben nem biológiai entitás, amely néhány évtizeddel ezelőtt még nem létezett: a számítógépes vírus. Amikor először felbukkant ez a destruktív behatoló, sokan komolyan aggódtak, hogy amikor fejlettebbé válnak, ezek a szoftveres kórokozók képesek lesznek elpusztítani a teljes számítógépes hálózatot, amelyben élnek. A problémára adott reakcióként kifejlesztett „immunrendszer” összességében mégis hatékonynak bizonyult. Noha a destruktív önreplikáló szoftver-entitások időről időre még mindig kárt okoznak, a kár mindössze töredéke azoknak az előnyöknek, amelyeket a számítógépek és az azokat összekötő kommunikációs csatornák biztosítanak.

Erre lehet azt mondani válaszul, hogy a számítógépes vírusok nem halálosak, szemben a biológiai vírusokkal vagy a destruktív nanotechnológiával. Ez nem minden esetben igaz; szoftverek működnek a segélyhívó központjainkban, szoftverek felügyelik a betegeket az intenzív osztályokon, szoftverek vezérlik a repülőgépek fel- és leszállását, szoftverek irányítják az intelligens fegyvereket, kezelik a pénzügyi tranzakcióinkat, működtetik a közműhálózatainkat, és még sok egyéb kritikus területet. Abból a szempontból, hogy a szoftveres vírusok jelenleg még nem jelentenek halálos fenyegetést, ez a megállapítás csak alátámasztja az érveimet. Az, hogy a számítógépes vírusok nem halálosak, mindössze azt eredményezi, hogy többen hajlamosak létrehozni és szabadjára engedni őket. A szoftvervírusok alkotóinak túlnyomó többsége nem engedné szabadjára a vírusait, ha fennállna a veszély, hogy ezzel embereket ölhet meg. És ez azt is jelenti, hogy a veszélyre adott reakciónk sem túl intenzív. Ennek megfelelően amikor önreplikáló, potenciálisan halálos entitásokra kerül majd a sor, a válaszuk is minden szinten sokkal komolyabb lesz.

Noha a szoftveres kórokozók továbbra is problémát fognak jelenteni, ma inkább kellemetlenségnek számítanak, mint valódi veszélynek. Ne feledjük, hogy egy olyan iparágban értünk el sikert az ellenük folytatott küzdelemben, amelyben a résztvevőkre szinte semmilyen szabályozás nem vonatkozik, és szinte semmiféle jogosítvány nem szükséges! A nagyrészt szabályozatlan számítógépes ipar egyben hihetetlenül produktív is. Azt is mondhatnánk, hogy jobban hozzájárult a technológiai és gazdasági fejlődésünkhöz, mint bármi más az emberi történelemben.

A szoftvervírusok és a szoftveres kórokozók serege elleni küzdelem azonban soha nem fog véget érni. Egyre jobban függünk a számítógépes rendszerektől, így az önreplikáló szoftverfegyverek potenciálja és rombolóképessége tovább fog nőni. Amikor szoftver fog futni az agyunkban, a testünkben, és szoftver fogja irányítani a világ nanobot-immunrendszerét, összehasonlíthatatlanul nagyobb lesz a tét.

A fundamentalizmus fenyegetése. A közelmúltban megjelent a vallási fundamentalizmus egy különösen veszélyes formája, a radikális iszlám terrorizmus. Noha úgy tűnhet, hogy ezeknek a terroristáknak a romboláson kívül nincs más programjuk, valójában van céljuk, ami túlmutat az ősi szent írássok szó szerinti értelmezésén: lényegében vissza akarják forgatni az idő kerekét, hogy megszűnjenek az olyan modern eszmék, mint a demokrácia, a nők egyenjogúsága és az oktatás.

Am a vallási szélsőségeség nem a fundamentalizmus egyetlen formája, amely reakciós erőt képvisel. A fejezet elején idéztem Patrick Moore, a Greenpeace egyik alapítója gondolatait arról, hogy csalódott a szervezetben. Moore azért távolodott el a Greenpeace-től, mert az teljes mértékben ellenezte a Golden Rice-t, egy genetikailag módosított rizsfajtát, ami nagy mennyiségű béta-karotint tartalmaz, az A-vitamin provitaminját.⁴⁷⁰⁹¹ Afrikában és Ázsiában százmilliók szenvednek A-vitaminhiánytól, évente félmillió gyermek vakul meg emiatt, és további milliók betegednek meg más betegségekben. Körülbelül napi húsz gramm Golden Rice fedezné egy gyermek A-vitamin-

szükségletének a száz százalékát. Kiterjedt kutatások mutatták ki, hogy ez a rizs, akárcsak sok egyéb genetikailag módosított organizmus (GMO), biztonságos. Például 2001-ben az Európai Bizottság nyolcvanegy tanulmányt adott ki, melyek arra a következtetésre jutottak, hogy a GMO-k „nem jelentenek semmilyen új veszélyt az emberi egészségre vagy a környezetre a hagyományos növénytermesztés szokásos bizonytalanságain kívül. Mi több, a precízebb technológia és a szabályozás nagyobb szigora miatt valószínűleg még biztonságosabbak is, mint a hagyományos növények és élelmiszerek.”^[710]

Nem azt akarom ezzel mondani, hogy minden GMO eredendően biztonságos; nyilvánvalóan minden egyes terméket meg kell vizsgálni. A GMO-ellenes mozgalom álláspontja azonban az, hogy minden GMO eredendően kockázatos, mely véleménynek semmiféle tudományos megalapozottsága nincs.

A Golden Rice forgalomba hozatalát legalább öt évvel késleltette a Greenpeace és egyéb GMO-ellenes aktivisták felől érkező nyomás. Moore felismerte, hogy ez a késlekedés több millió gyerek megvakulását okozza. A rizsfajta ellenzőit idézi, akik fenyegetőztek, hogy „kitépik a genetikailag módosított rizst a földből, ha a földművesek elültetik”. Hasonlóképpen az afrikai országokra is nyomást gyakoroltak, hogy utasítsák vissza a génmódosított élelmiszereket és vetőmagvakat, amivel tovább súlyosbították az éhezést.^[711] A nyomasztó problémák megoldását célzó, a GMO-khoz hasonló technológiák bizonyított képességei végül győzedelmeskedni fognak, de az irracionális ellenállás okozta ideiglenes késlekedések akkor is felesleges szenvedést okoznak.

A környezetvédő mozgalom bizonyos elemei fundamentalista ludditává váltak – „fundamentalistává” azon félrevezetett próbálkozásaik miatt, hogy úgy őrizték meg a dolgokat, ahogy vannak (vagy voltak); és „ludditává”, mert reflexszerűen szembehelyezkednek a súlyos problémák technológiai megoldásaival. Ironikus módon éppen a GMO-növények – melyek közül sokat úgy módosítottak, hogy ellenállók legyenek a rovarokkal és egyéb kártevőkkel szemben, s így sokkal kevesebb növényvédő szert kell használni a művelésük során, ha kell egyáltalán – jelentik a reményt a vegyszerek, például a növényvédő szerek okozta környezetszennyezés visszafordítására.

A „fundamentalista luddita” jelzős szerkezet valójában tautológia, hiszen a luddizmus eredendően fundamentalista. Azt az eszmét testesíti meg, hogy az emberiség jobban meglenne változás, fejlődés nélkül. Ezzel visszatértünk a lemondás gondolatához, mivel a technológiai fejlődésről való széles körű lemondás iránti lelkesedés ugyanazoktól az értelmiségi forrásoktól és aktivista csoportoktól származik, amelyek a környezetvédő mozgalmak luddita frakcióját alkotják.

Fundamentalista humanizmus. Most, hogy a „G” és „N” technológiákkal elkezdjük módosítani a testünket és az agyunkat, egy másik fajta ellenállás is kialakult a haladással szemben a „fundamentalista humanizmus” formájában. A fundamentalista humanizmus ellenez minden változást abban, hogy mit jelent embernek lenni (például a génjeink megváltoztatását és egyéb lépések megtételét az élet radikális meghosszabbítása felé). Azonban ennek az irányzatnak az erőfeszítései is kudarcot fognak vallani, mivel az 1.0-s testünkkel eredendően együtt járó szenvedés, betegségek és rövid élet terápiái iránti igény végül ellenállhatatlannak bizonyul majd.

Végül csak a technológia – különösen a GNR – biztosíthatja az ahhoz szükséges erőt, hogy megoldjuk azokat a problémákat, amelyekkel nemzedékek óta hiába küzd az emberi civilizáció.

A védelmi technikák kidolgozása és a szabályozás hatása

A felszólítások a széles körű lemondásra többek között azért lehetnek vonzóak, mert úgy ábrázolják

a holnap veszélyeit, mintha azok a ma felkészületlen világában szabadulnának el. A valóságban azonban a védelmi ismereteink és technológiánk ereje párhuzamosan fog növekedni a veszélyekkel. A szürke masszával (a nanobotok elszabadult replikációjával) szemben ott fog állni a „kék massa” (a „rendőr” nanobotok, amelyek felveszik a küzdelmet a „rossz” nanobotokkal). Nyilván nem jelenthetjük ki teljes bizonyossággal, hogy sikeresen elejét fogjuk venni a technológia rosszindulatú felhasználására tett összes próbálkozásnak. Ám a hatékony defenzív technológiák kifejlesztését azzal lehet a legbiztosabban megakadályozni, ha több nagy tudományterületen korlátozzuk az ismeretek bővítését. Az ártalmas szoftvervírusok szaporodását azért tudjuk összességében kordában tartani, mert az ehhez szükséges tudás széles körben hozzáférhető a felelősségteljes szakemberek számára. Ha megpróbálnánk korlátozni ezt a tudást, sokkal instabilabbá válna a helyzet. Sokkal lassabban reagálnánk az új kihívásokra, és valószínű, hogy a mérleg nyelve a destruktív alkalmazások (például az önmagukat módosító szoftvervírusok) felé billenne.

Ha összehasonlítjuk a mesterséges számítógépes vírusok elleni küzdelemben elért sikereinket a génmódosított biológiai vírusok elleni küzdelem jövőbeli kihívásával, egy kiugró különbséget láthatunk. Mint korábban megjegyeztem, a szoftveripar szinte teljesen szabályozatlan. Ugyanez természetesen nem igaz a biotechnológiára. Míg egy bioterroristának nem kell átverekednie a „találmányait” az FDA-n (*Food and Drug Assistance*-en; az Egyesült Államok Élelmiszer- és Gyógyszerhatóságán) a defenzív technológiákat fejlesztő tudósoknak muszáj betartaniuk a hatályos törvényeket, ami minden egyes fázisban lassítja az innováció folyamatát. Ráadásul a jelenlegi szabályozás és etikai normák mellett lehetetlen tesztelni a defenzív technológiákat a bioterrorista ágensekkel szemben. Már széles körű vita folyik a jelenlegi szabályozás oly módon történő módosításáról, mely lehetővé tenné, hogy a kivitelezhetetlen emberi kísérleteket állati modellekkel és szimulációkkal helyettesítsék. Erre szükség lesz, de szerintem még ennél is tovább kell mennünk, hogy felgyorsítsuk a létfontosságú védelmi technológiák fejlesztését.

A politika feladata az, hogy kifejlessze a szükséges defenzív lépéseket, köztük az etikai és jogi sztenderdeket, illetve magukat a védelmi technológiákat. Mint megjegyeztem, a szoftverek területén a defenzív technológiák gyorsan reagálnak az offenzív technológiai fejlesztésekre. Az orvostudomány területén ezzel szemben a kiterjedt szabályozás lelassítja az innovációt, tehát a biotechnológiával való visszaélés vonatkozásában nem lehetünk ugyanilyen magabiztosak. A jelenlegi környezetben komolyan visszafoghatja a kutatásokat, ha valaki meghal a génterápia klinikai tesztelése során.^[712] Jogos az igény, hogy az orvosbiológiai kutatások a lehető legbiztonságosabbak legyenek, de a mérleg nyelve túlságosan a kockázatok hangsúlyozása felé billent el. Millióknak lenne óriási szükségük a génterápia és az egyéb, áttörést jelentő biotechnológiai fejlesztések nyújtotta reményre, de úgy tűnik, az ő politikai súlyuk nagyon csekély a fejlődéssel óhatatlanul együtt járó kockázatok miatt történt maroknyi, ám nagy publicitást kapott halálesettel szemben.

A kockázatokat mérlegelő egyenlet még jobban felborul, ha a genetikailag módosított kórokozók jelentette közelgő veszélyre gondolunk. Meg kell változtatnunk a közvélemény hozzáállását a szükséges kockázatokkal szembeni tolerancia terén. A védelmi technológiák fejlesztésének felgyorsítása létfontosságú a biztonságunk szempontjából. Ennek eléréséhez fel kell gyorsítanunk az engedélyeztetési eljárásokat, ugyanakkor nagymértékben növelnünk kell a befektetéseket a defenzív technológiák területén. A biotechnológiában ezt azt jelenti, hogy gyorsítani kell a vírusok elleni gyógymódok kifejlesztését. Nem lesz időnk specifikus ellenlépéseket tenni minden egyes felbukkanó új kihívással szemben. Közel járunk ahhoz, hogy általánosabb vírusok elleni technológiák szülessenek, mint például az RNS-interferencia, de fel kell gyorsítani a fejlesztésüket.

Azért írok most a biotechnológiáról, mert ez a legközelebbi küszöb és kihívás, ami előttünk áll.

Ahogy mind közelebb érünk az önszervező nanotechnológia küszöbéhez, úgy kell egyre több energiát, időt és pénzt fektetnünk a védelmi technológiák fejlesztésébe, ideértve a technológiai immunrendszer kialakítását is. Gondoljunk arra, hogyan működik a biológiai immunrendszerünk! Amikor a test kórokozót észlel, a T-sejtek és az immunrendszer többi sejtje gyorsan szaporodni kezdenek, hogy felvegyék a harcot a behatolóval. A nanotechnológiai immunrendszer hasonlóképpen működne az emberi testben és a környezetben egyaránt, és részei lennének a nanobotörök is, amelyek az elszabadult, önreplikáló nanobotokra ügyelnének. Amikor veszélyt érzékelnének, gyorsan létrejönnének (végső soron önreplikálás révén) az ezeket a behatolókat elpusztítani képes defenzív nanobotok, hogy hatékony védőerőt biztosítsanak.

Bill Joy és más gondolkodók arra hívták fel a figyelmet, hogy maga ez az immunrendszer is veszélyt jelentene az „autoimmun” reakciók (amikor a nanobotok azt a világot támadják meg, amelyet meg kellene védeniük) lehetősége miatt.^[713] Ez az eshetőség azonban nem meggyőző érv az immunrendszer létrehozásával szemben. Senki sem érvelne azzal, hogy az emberek jobban meglennének az immunrendszerük nélkül, mert az immunrendszerrel fennáll az autoimmun betegségek kialakulásának a veszélye. Noha maga az immunrendszer is jelenthet veszélyt, az ember alig néhány hetet bírna ki nélküle (a teljes elszigetelődést célzó rendkívüli erőfeszítések nélkül). Ráadásul a nanotechnológia „immunrendszere” anélkül is ki fog alakulni, hogy tudatos erőfeszítéseket tennénk a létrehozására. Gyakorlatilag ez történt a szoftvervírusok esetében is: az immunrendszer nem egy hivatalos, nagy ívű projekt nyomán alakult ki, hanem fokozatosan, az újabb és újabb kihívásokra adott reakcióként és a korai előrejelzésekre kidolgozott heurisztikus algoritmusok révén. Számíthatunk rá, hogy ugyanez fog bekövetkezni, amint megjelennek a nanotechnológia-alapú veszélyek. A politikának az lesz a feladata, hogy kifejezetten ezeket a védelmi technológiákat támogassa.

Ma még idő előtti lenne konkrét defenzív nanotechnológiákat kifejleszteni, hiszen még csak nagy vonalakban tudjuk, hogy mi ellen próbálunk védekezni. Mindazonáltal a probléma kapcsán már gyümölcsöző dialógus és vita alakult ki, és támogatni kell, hogy jelentősen növekedjen az ezekben az erőfeszítésekben fektetett energia, munka, idő és pénz. Mint korábban említettem, többek között a Foresight Intézet is kidolgozott egy etikai normarendszert és több stratégiát a biztonságos nanotechnológia kifejlesztésének biztosítására a biotechnológiai irányelvek alapján.^[714] Amikor 1975-ben megkezdődött a génmanipuláció, két biológus, Maxine Singer és Paul Berg moratóriumot javasolt a technológiára, míg megnyugtatóan nem rendeződnek a biztonsági kérdések. Nyilvánvalónak tűnt, hogy komoly kockázatot jelent, ha mérgező géneket ültetnek be könnyen terjedő kórokozókba, mint például a közönséges náthába. A tíz hónapos moratóriumot követően az Asimolar konferencián elfogadták az irányelveket, melyek kitértek a fizikai és biológiai elszigetelésre, bizonyos típusú kísérletek tiltására és egyéb helyzetekre. Ezeket a biotechnológiai irányelveket azóta is szigorúan betartják, és a tudományterület harmincéves történetéből nem ismerünk baleseteket.

A közelmúltban a világ szervátültetéssel foglalkozó sebészeit tömörítő szervezet moratóriumot fogadott el a vaszkularizált állati szervek emberekbe történő átültetésével kapcsolatban. A döntést az a félelem vezérelte, hogy régóta alvó, HIV-jellegű xenovírusok kerülhetnek át az emberi népességbe olyan állatokból, mint például a sertések és a páviánok. Sajnos az ilyen moratóriumok ugyanakkor lelassíthatják az életmentő xenograftok (genetikailag módosított állati szervek, amelyeket befogad az emberi immunrendszer) hozzáférhetőségét is azon milliók számára, akik évente meghalnak szív-, vese- és májbetegségekben. Martine Rothblatt geoeitikus azt javasolta, hogy a moratóriumot új irányelvekkel és szabályozással váltsák fel.^[715]

A nanotechnológia esetében az etikai vita már néhány évtizeddel a különösen veszélyes alkalmazások hozzáférhetővé válása előtt elkezdődött. A Foresight Intézet irányelveinek legfontosabb

pontjai között szerepelnek a következők:

- „A mesterséges replikátorok nem lehetnek képesek arra, hogy természetes, ellenőrizetlen környezetben szaporodjanak.”
- „Tiltott az önreplikáló gyártórendszerek evolúciója.”
- „Az MNT-eszközök felépítésének kifejezetten korlátoznia kell minden replikálódó rendszer szaporodását, és biztosítania kell az eszközök nyomomonkövethetőségét.”
- „Ahol csak lehet, a molekuláris gyártás *fejlesztési* képességét azon felelős szereplőkre kell korlátozni, amelyek elfogadták az irányelveket. Ugyanezt a korlátozást nem kell alkalmazni a fejlesztési folyamat végtermékeire.”

A Foresight Intézet emellett a következő stratégiák alkalmazását javasolja:

- A replikáció olyan alapanyagokat igényeljen, amelyek nem találhatók meg a természetben.
- A gyártás (sokszorosítás) váljon el a végtermékek funkciójától. A gyártóeszközök legyenek képesek a végtermékek előállítására, de önmaguk ne tudjanak replikálódni, és a végtermékek se legyenek képesek erre.
- A replikációhoz legyen szükség titkosított és időben korlátozott érvényességű replikációs kódokra. A korábban említett szétszórt (drót nélküli utasításokon alapuló) architektúra egy példa erre az ajánlásra.

Ezek az irányelvek és stratégiák valószínűleg hatékonyan meggátolják majd, hogy veszélyes, önreplikáló nanotechnológiai entitások szabaduljanak el véletlenül. Az ilyen entitások szándékos megalkotásával és szabadjára engedésével való megbirkózás azonban összetettebb és komolyabb probléma. Vegyük például a szétszórt architektúrát! Ha helyesen valósítják meg, az egyes entitások nem képesek a replikációs kód nélkül replikálódni. A replikációs kód minden nemzedék esetében más és más. Ugyanakkor az eszközök módosítása révén meg lehet kerülni a replikációs kódok törlését, s így azok továbbadhatóvá válnak a következő nemzedéknek. Ennek a lehetőségnek a kivédésére azt javasolták, hogy a replikációs kódot tároló memória csak a teljes kód egy részére legyen korlátozva. Azonban ez az ajánlás is megkerülhető az entitások memóriájának a növelésével.

A másik javaslat szerint titkosítani kell a kódokat, és a visszafejtő rendszerekbe is biztonsági eszközöket kell beépíteni, például időzárat. Azonban ma már tudjuk, milyen könnyű feltörni a szellemi termékek, például a zenei fájlok jogosulatlan másolását megakadályozni hivatott védelmeket. A replikációs kódok és a védelmi rétegek lehámozása után mindenféle korlátozás nélkül lemásolható az információ.

Ez nem azt jelenti, hogy lehetetlen védekezni, csak azt, hogy a védekezés minden szintje csupán egy bizonyos fokig képes működni. A tanulság az, hogy a XXI. századi társadalom legfontosabb feladata a védelmi technológiák folyamatos továbbfejlesztése, hogy mindig egy vagy több lépéssel a destruktív technológiák előtt járjanak (vagy legalábbis ne legyenek egy lépésnél többel lemaradva azoktól).

Védelem a „barátságtalan” erős MI-vel szemben. Ám akármilyen hatékony mechanizmus is a szétszórt architektúra, az erős MI-vel szemben nem fog megvédeni. A szétszórt architektúra által biztosított gátak a nanoentitások intelligenciájának hiányán alapulnak. Az intelligens entitások azonban elég okosak ahhoz, hogy megkerüljék ezeket a gátakat.

Eliezer Yudkowski számos paradigmát, architektúrát és etikai szabályt elemzett, melyek segíthetnek biztosítani azt, hogy amikor az erős MI rendelkezésére állnak az eszközök, amelyekkel

elérheti és módosíthatja a saját felépítését, akkor is barátságos maradjon a biológiai emberiséghez és támogassa annak értékeit. Tekintettel arra, hogy az MI-t nem lehet visszahívni, Yudkowski hangsúlyozza, hogy „elsőre jól kell megcsinálni”, és már a megszületését célzó első tervnek „nulla javíthatatlan hibája lehet”.^[716]

Eredendően nem lesz abszolút védelem az erős MI-vel szemben. Noha a kérdés összetett, én úgy vélem, hogy a legkonstruktívabb környezet egy technológia számára az emberi értékek széles körének magáévá tételéhez a tudományos és technológiai fejlődés nyitott, szabadpiaci rendszerének fenntartása, melyben minden lépés elfogadásáról vagy elvetéséről a piac dönt. Amint arra rámutattam, az erős MI sok különböző erőfeszítés eredményeként fog megjelenni, és mélyen be lesz ágyazva a civilizációnk infrastruktúrájába. Mi több, be lesz ágyazva a testünkbe és az agyunkba. Azért fogja a mi értékeinket képviselni, mert mi magunk fogjuk alkotni. Ha titkos kormányzati programokkal próbálnák ellenőrzés alá vonni ezeket a technológiákat, akkor óhatatlanul megjelenne a földalatti fejlesztés, és ez csak olyan bizonytalan környezetet hozna létre, amiben nagyobb valószínűséggel válnának dominánssá a technológia veszélyes alkalmazási módjai.

Decentralizáció. Az egyik hangsúlyos, már javában zajló trend, ami nagyobb stabilitást fog eredményezni, a centralizált technológiákról az elosztottakra való átállás, illetve a valódi világból a virtuális világba való átköltözés. A centralizált technológiákban erőforrások egyesülnek, például emberek (városok, épületek), energia (atomerőművek, folyékony földgáz- és olajtankerek, energiavezetékek), szállítás (repülőgépek, vonatok) és egyéb tételek. A centralizált rendszerek ki vannak téve az üzemzavaroknak és a természeti katasztrófáknak. Emellett nem hatékonyak, pazarlóak és környezetszennyezőek.

Ezzel szemben az elosztott technológiák rugalmasak, hatékonyak és viszonylag kevésbé szennyeznek a környezetet. Az elosztott technológia legjobb és legszemléletesebb példája az internet. Az internetet mindmáig nem érte jelentős meghibásodás, egyre növekszik, ereje és ellenálló képessége egyre nagyobb. Ha bármelyik elosztó vagy csatorna elromlik, az információ egyszerűen más útvonalat keres magának.

Elosztott energiarendszerek. Az energia területén el kell távolodnunk a rendkívül koncentrált és centralizált létesítményektől, amelyektől jelenleg függünk. Az egyik cég például a MEMS-technológia felhasználásával mikroszkopikus méretű energiasejteket fejleszt.^[717] Úgy készülnek, mint a chipek, de valójában energiataroló eszközök, melyek energia-méret-aránya jelentősen meghaladja a hagyományos technológiáét. Mint korábban említettem, a nanotechnológia-alapú napelemek elosztott, megújuló és tiszta módon fogják kielégíteni energiaigényünket. Az ezen irányvonalak mentén fejlődő technológia végül képes lesz mindent energiával ellátni a mobiltelefonunktól kezdve az autóinkon át a házaikig. És az ilyen decentralizált energiaforrások nem lesznek kitéve a meghibásodásoknak, illetve a természeti katasztrófáknak.

Ezeknek a technológiáknak a kifejlődése után az embereknek nem kell többé nagy házakban összegyűlniük, a városok eltűnnek, az emberek pedig szétszóródnak, ott élnek majd, ahol szeretnének, és a virtuális valóságban gyűlnek össze.

Polgári szabadságjogok az aszimmetrikus hadviselés korában. A terrorista támadások jellege és a mögöttük álló szervezetek filozófiái rávilágítanak, hogyan kerülhetnek ellentétbe a polgári szabadságjogok az állam megfigyelésre és irányításra vonatkozó törvényes érdekeivel. A

rendfenntartó rendszerünk – és igazából a biztonságról való gondolkodásunk – azon a feltételezésen alapul, hogy az emberek motiváltak saját életük és jólétük megőrzésére. Ez a logika áll az összes stratégiánk mögött, a helyi szintű védelemtől kezdve a világméretű, kölcsönös elrettentés politikájáig. Az az ellenség azonban nem illeszthető be ebbe a logikába, amelyik a célpontjával együtt saját magát is hajlandó elpusztítani.

A saját túlélését semmire sem tartó ellenséggel való szembekerülés nagyon nyugtalanító eshetőségeket hordoz magában, és olyan vitákat eredményezett, amelyek csak fokozódni fognak, ahogy nő a tét. Például amikor az FBI azonosít egy valószínűsíthető terrorista sejtet, letartóztatja a résztvevőket, pedig talán nincs is elég bizonyíték ahhoz, hogy ítélet szülessen az ügyükben, és talán el sem követtek semmit. A terrorizmus elleni háborúnk szabályai szerint a kormány jelenleg fogva tarthatja ezeket a személyeket.

A *New York Times* vezércikkben tiltakozott ez ellen az eljárás ellen, és „aggasztó intézkedésnek” nevezte.^[718] A cikk a fogvatartottak szabadon engedését követelte, azzal érvelve, hogy még nem követtek el bűncselekményt, és csak azután szabad újra letartóztatni őket, miután ténylegesen elkövettek valamit. Persze lehet, hogy addigra a gyanúsítottak halottak lesznek – az áldozataikkal együtt. Hogyan számolhatnák fel a hatóságok az öngyilkos terrorista sejtekből álló decentralizált hálózatot, ha meg kell várniuk, hogy mindegyik elkövesse a bűncselekményt?

Másfelől a zsarnoki rezsimek rutinszerűen alkalmazták ezt a logikát, hogy igazolják az általunk oly nagyra tartott igazságszolgáltatási eljárások mellőzését. Hasonlóképpen jogos az az érv is, hogy éppen a polgári szabadságjogok ilyen jellegű korlátozása a terroristák célja, akik megvetik a szabadságról és a pluralizmusról alkotott felfogásunkat. Összességében nem látom, hogy számíthatnánk bármilyen technológiai „varázslövedékre”, amely lényegesen megváltoztatná ezt a dilemmát.

A titkosító algoritmusokban meghagyott hátsó ajtókat tekinthetjük olyan technikai innovációnak, amely a kormányzat javaslatára született, a kormány megfigyelési igényével ellensúlyozandó az egyén magánéletre vonatkozó jogos igényét. Ehhez a technológiához szükség van olyan politikai újításokra is, amelyek biztosítják a végrehajtó ág feletti hatékony felügyeletet mind az igazságszolgáltatás, mind a törvényhozás hatalmi ágai részéről, hogy elejét vegyék a hatalmi visszaéléseknek. Ellenségeink titkolózó természete és az emberi élet értékével szembeni közönye, beleértve a sajátjukat is, komolyan próbára fogja tenni demokratikus hagyományaink alapjait.

A GNR-védelem programja

„Lényegében az aranyhalaktól származunk, de ez nem jelenti azt, hogy megfordultunk és megöltünk minden aranyhalat. Lehet, hogy [az MI-k] hetente egyszer megetetnek majd minket... Ha lenne egy gépünk, amelynek az IQ-ja az emberi IQ trilliószorosa lenne, akkor nem akarnánk-e, hogy irányítsa, de legalábbis szabályozza a gazdaságunkat?”

(Seth Shostak)

Hogyan biztosíthatjuk a GNR előnyeit úgy, hogy közben kiküszöböljük a veszélyeit? A következőkben összefoglalom a GNR kockázatainak minimalizálását megcélzó programot:

A legsürgetőbb javaslat az, hogy *nagymértékben növeljük a defenzív technológiákba fektetett energia, pénz és idő mennyiségét.* Mivel már most a „G” korszakban vagyunk, *a befektetések túlnyomó részének ma a (biológiai) vírusellenes gyógyszerek és kezelések felé kell*

irányulnia. Vannak új, erre a feladatra kiválóan alkalmas eszközeink. Az RNS-interferenciát például bevethetjük a génexpresszió blokkolására. Gyakorlatilag minden fertőzés (és a rák is) a génexpressziótól függ életciklusa valamelyik pontján.

Az N és R biztonságos irányításához szükséges defenzív technológiák elméleti kidolgozását szintén támogatni, és ezt a támogatást jelentősen növelni kell, ahogy közeledünk előbb a molekuláris gyártás, majd az erős MI megvalósulásához. Ennek jelentős és jóindulatú mellékhatása lenne a fertőző betegségek és a rák hatékony kezeléseinek a felfedezése. Erről a problémáról a Kongresszus előtt is beszámoltam, és azt javasoltam, hogy évente több tízmilliárd dollárt (ami kevesebb, mint a GDP egy százaléka) fordítsunk az emberiségre leselkedő új, nem eléggé elismert egzisztenciális fenyegetések elhárítására.^[719]

- Fel kell gyorsítani a genetikai és orvosi technológiák engedélyeztetési eljárását. A jelenlegi szabályok nem gátolják meg e technológiák rosszindulatú felhasználását, azonban jelentősen késleltetik a szükséges védelem kialakítását. Mint említettem, jobb egyensúlyt kell találnunk az új technológiák (például az új gyógymódok) kockázatai és a késlekedésből származó ismert károk között.
- Létre kell hozni egy globális programot az ismeretlen vagy újonnan kialakuló biológiai kórokozók bizalmas, szűrőpróbaszerű szérumellenőrzésére. Léteznek olyan diagnosztikai eszközök, melyekkel gyorsan igazolni lehet ismeretlen fehérje- vagy nukleinsav-szekvenciák meglétét. A hírszerzés a védekezés kulcsa, és ez a program felbecsülhetetlen értékű korai figyelmeztetést nyújthatna a kitörni készülő járványokról. Ezt a „kórokozóország” programot már évek óta javasolják a közegészségügyi hatóságok, de mindeddig nem kaptak kellő anyagi támogatást.
- Jól meghatározott célú, ideiglenes moratóriumokra, mint ami a genetika területén történt 1975-ben, időről időre szükség lehet. A nanotechnológia esetében azonban valószínűleg nem lesz szükség rájuk. A technológia széles területeinek a tiltásával csak az emberi szenvedés idejét nyújtjuk meg, mivel késleltetjük az új technológiák jótékony hatásait, s ezzel csak még komolyabbá tesszük a veszélyeket.
- Folytatódjon a nanotechnológia biztonsági és etikai irányelveinek a kidolgozása. Ezek az irányelvek óhatatlanul egyre részletesebbek és pontosabbak lesznek, ahogy közeledünk a molekuláris gyártás megvalósulása felé.
- Ahhoz, hogy megszerezzük a fent említett intézkedések anyagi háttérét biztosító politikai támogatást, *fel kell hívni a közvélemény figyelmét ezekre a veszélyekre*. A rémhírkeltéssel és a pontatlan információkkal csak technológiaellenes törvényeknek lehet széles körű támogatást szerezni, ezért a technológiai fejlődés előnyeit is érthetően be kell mutatni a közvéleménynek.
- A veszélyek átvivnek az országhatárokon – amiben persze nincs semmi új; a biológiai és a számítógépes vírusok vagy a rakéták már most szabadon áthágják ezeket a határokat. *A nemzetközi együttműködés* elengedhetetlen volt a SARS-vírus megfékezéséhez, és egyre fontosabb lesz a jövőbeli problémák leküzdésében. A világszervezeteket, például a SARS-ra adott reakció koordinálásában segédkező Egészségügyi Világszervezetet meg kell erősíteni.
- Vitatott politikai kérdés a megelőző csapás a háborús fenyegetésekkel, például a tömegpusztító fegyverekhez hozzáférő terroristákkal vagy az őket támogató országokkal szemben. Az ilyen intézkedések mindig is vitatottak lesznek, de az egyértelmű, hogy szükség lehet rájuk. Egy nukleáris robbanás néhány másodperc alatt el tud pusztítani egy egész

vároست. Egy önreplikáló kórokozó, akár biológiai, akár nanotechnológiai alapú, néhány nap vagy hét alatt az egész civilizációkat elpusztíthatja. Nem várhatjuk meg mindig a csapatösszevonásokat vagy a támadó szándék egyéb jeleit, mielőtt védekezni kezdünk.

- A hírszerző ügynökségeknek és a rendfenntartó szervezeteknek kulcsszerepe lesz a potenciálisan veszélyes incidensek túlnyomó többségének a megelőzésében. A munkájukhoz szükségük lesz a lehető legnagyobb teljesítményű technológiákra. Például még ennek az évtizednek a vége előtt porszem nagyságú eszközökkel lehet majd felderítéseket végrehajtani. A 2020-as években, amikor szoftverek fognak futni a testünkben és az agyunkban, a kormánysszerveknek jogos igényük lesz arra, hogy időnként megfigyeljék ezeket a szoftvereket. Nyilvánvaló, milyen hatalmi visszaélésekre adhat ez lehetőséget. Meg kell találnunk a középutat a katasztrofális események meggátlása és a magánéletünk, valamint a szabadságunk megőrzése között.

- Azonban a fenti intézkedések sem lesznek elégségesek a patológikus „R” (a rosszindulatú erős MI) jelentette veszélyek elhárításához. Ezen a területen az lehet az elsődleges stratégiánk, hogy optimalizáljuk annak a valószínűségét, hogy a jövőbeli nem biológiai intelligencia a mi szabadságra, toleranciára, a tudás és a sokszínűség tiszteletére vonatkozó értékeinket a magáénak fogja tartani. Ezt úgy érhetjük el a legbiztosabban, ha már most és a későbbiekben is ezeket az értékeket tápláljuk a társadalmunkban. Ha ez homályosan hangzik, az azért van, mert valóban homályos. De ezen a területen nincs működőképes, tisztán technikai stratégia, mivel a nagyobb intelligencia mindig meg fogja találni a módját, hogy megkerülje a kisebb intelligencia által felállított korlátokat. A nem biológiai intelligencia, amit létre készülünk hozni, be lesz ágyazva a társadalmunkba és a mi értékeinket fogja a magáénak vallani. A transzbiológiai korszakban a nem biológiai intelligencia mélyen egybeforr majd a biológiaival. Ez fel fogja fokozni a képességeinket, és a nagyobb intellektuális képességeket lehetővé tévő megoldásokat az azokat megeremtő emberek értékeinek megfelelően fogjuk alkalmazni. A transzbiológiai kor végül teret nyit majd a posztbiológiai kor előtt, de csak remélni tudjuk, hogy a jelenlegi alapértékeink akkor is befolyással bírnak majd. Ez a stratégia semmiképpen sem bolondbiztos, de ma ez az elsődleges eszközünk arra, hogy befolyásoljuk az erős MI jövőbeli pályáját.

A technológia mindig is kétélű fegyver lesz. Óriási hatalom, amelyet az egész emberiség javára kell felhasználni. A GNR biztosítani fogja az eszközöket, amelyekkel ősrégi problémákat oldhatunk meg, úgymint a betegséget és a szegénységet, de a destruktív ideológiák kezében is fegyver lehet. Nincs más választásunk, mint megerősíteni a védelmünket, miközben az emberi értékek továbbvitelére alkalmazzuk az egyre gyorsabban fejlődő technológiát – annak ellenére, hogy látszólag nincs konszenzus ezen értékek mibenlétét illetően.

MOLLY 2004: *Oké, most vegyük csak át még egyszer azt a lopakodós forgatókönyvet... tudod, azt, amikor a rossz nanobotok gyorsan, de észrevétlenül elterjednek a biomasszában, majd egyszerre kezdenek szaporodni, és pillanatok alatt végeznek a bolygóval.*

RAY: *Nos, a nanobotok nagyon alacsony koncentrációban fognak terjedni, mondjuk egy jut majd a biomassza minden 10^{15} szénatomjára, tehát észrevétlenül eljutnak mindenhová. Így a romboló nanobotok sebessége nem lesz majd tényező, amikor a helyük elfoglalása után szaporodni kezdenek. Ha átugranak ezt a lopakodó fázist, és egyetlen pontból kiindulva kezdenének terjeszkedni, észrevehetnénk a terjedő nanofertőzést, ami viszonylag lassan*

haladna körbe a bolygón.

MOLLY 2004: *És hogy tudunk védekezni ez ellen? Amikor elkezdik a második fázist, már csak úgy másfél óránk marad, vagy sokkal kevesebb, ha nem akarunk borzalmas veszteségeket szenvedni.*

RAY: *Az exponenciális növekedés jellege miatt a kár túlnyomó része az utolsó percekben keletkezne, de értem, mire gondolsz. Akármelyik forgatókönyvet is nézzük, esélyünk sem lesz a szürke massa ellen a nanotechnológia-alapú immunrendszer nélkül. Nyilvánvalóan nem várhatjuk meg a másfél órás rombolási ciklus kezdetét, hogy majd csak akkor kezdjünk el gondolkodni ennek az immunrendszernek a létrehozásán. Ez egyébként nagyon hasonló lenne a mi emberi immunrendszerünkhöz. Meddig maradna életben egy biológiai ember 2004-ben immunrendszer nélkül?*

MOLLY 2004: *Gondolom, nem sokáig. De hogy szűrja ki ez a nanoimmunrendszer a rossz nanobotokat, ha egyszer egy van belőlük ezerbillió atomban?*

RAY: *Ugyanez a feladata a biológiai immunrendszerünknek is. Akár egyetlen idegen fehérje észlelése is beindítja a biológiai antitestgyárat, így az immunrendszer nagy erővel tud fellépni, mire a kórokozó megközelíti a kritikus szintet. Hasonló képességekkel kell felruháznunk a nanoimmunrendszert is.*

CHARLES DARWIN: *Azt mondja meg nekem, képesek lesznek-e replikálódásra az immunrendszer nanobotjai?*

RAY: *Erre szükség lesz, különben nem tudnának lépést tartani a replikálódó kórokozó nanobotokkal. Születtek javaslatok arra, hogy telepítsünk a biomasszába bizonyos koncentrációban védelmező immunrendszer-nanobotokat, de amint a rossz nanobotok száma jelentősen meghaladná ezt a rögzített koncentrációt, az immunrendszer veszítene. Robert Freitas azt javasolta, hogy ne replikálódó nanogyárak állítsák elő szükség esetén az újabb védelmező nanorobotokat. Szerintem ez a megoldás egy ideig meg tudna birkózni a veszéllyel, de végül az immunrendszernek szüksége lesz arra a képességre, hogy helyben replikálja a védelmező nanobotokat, és lépést tartson a kialakuló veszéllyel.*

CHARLES: *De akkor az immunrendszer nanorobotjai nem teljesen ugyanolyanok, mint az első fázis rosszindulatú nanobotjai? A lopakodó forgatókönyv első fázisára, a biomassa megfertőzésére gondolok.*

RAY: *De az immunrendszer nanobotjai arra lesznek programozva, hogy megvédjenek minket, nem arra, hogy elpusztítsanak.*

CHARLES: *Úgy tudom, a programozást meg lehet változtatni.*

RAY: *Úgy érti, fel lehet törni?*

CHARLES: *Igen, pontosan. És ha az immunrendszer szoftverét egy hacker megváltoztatja, hogy egyszerűen kapcsolja be a saját önreplikáló képességét...*

RAY: *...igen, hát ezzel vigyáznunk kell, igaz?*

MOLLY 2004: *Alighanem.*

RAY: *Ugyanez a probléma fennáll a biológiai immunrendszer esetében is. Az immunrendszerünk hasonlóan erős, és ha ellenünk fordul, autoimmun betegségről beszélünk, ami borzalmas tud lenni. Az immunrendszerünknek még sincs alternatívája.*

MOLLY 2004: *Tehát egy szoftvervírus lopakodó pusztítókká változtathatja a nanobot-immunrendszert?*

RAY: *Igen, ez lehetséges. Az igazság kedvéért el kell mondani, hogy a szoftverbiztonság*

kulcsfontosságú kérdés lesz az ember–gép-civilizáció számos szintjén. Amikor minden információvá válik, a védelmi technológiáink szoftvereintegritásának a fenntartása kritikus lesz a túlélésünk szempontjából. Még gazdasági szinten is kritikus lesz a jólétünk szempontjából annak az üzleti modellnek a fenntartása, ami információt állít elő.

MOLLY 2004: Ettől teljesen tehetetlennek érzem magam. Úgy értem, én csak tétlen nézelődő lehetek, miközben a jó meg a rossz nanobotok megvívják a harcukat.

RAY: Ez azért nem új jelenség. Mennyi befolyásod van 2004-ben a világon létező több tízezer tonnányi atomfegyver bevetésére?

MOLLY 2004: Legalább felemelhetem a hangom és szavazhatok a választásokon, és így befolyásolhatom a külpolitikát.

RAY: Semmi sem indokolja, hogy ez megváltozzon. A 2020-as és 2030-as évek egyik nagy politikai vitatémája a megbízható nanotechnológiai immunrendszer létrehozása lesz.

MOLLY 2004: És akkor mi van az erős MI-vel?

RAY: A jó hír az, hogy meg fog védeni minket a rosszindulatú nanotechnológiától, mert elég okos lesz ahhoz, hogy a destruktív nanobotokat megelőzve segítsen kidolgozni a defenzív technológiákat.

NED LUDD: Feltéve, hogy egyáltalán a mi oldalunkon fog állni.

RAY: Valóban.

Kilencedik fejezet

Válasz a kritikákra

„Az emberi elme ugyanúgy nem szereti a fura elképzeléseket, mint ahogyan a test sem szereti a különös fehérjét, és a testhez hasonló energiával tiltakozik ellenük.”

(W. I. Beveridge)

„Ha egy (...) tudós valamiről azt állítja, hogy lehetséges, majdnem biztos, hogy igaza van, ám ha azt mondja, hogy lehetetlen, nagy valószínűséggel téved.”

(Arthur C. Clarke)

A kritikák köre

A *The Age of Spiritual Machines* (A spirituális gépek kora) című könyvemben már elkezdtem megvizsgálni azokat a gyorsuló tendenciákat, amelyeket nagyobb mélységükben deríték fel ebben a kötetben. A korábbi könyvemben írtak a legkülönbébb véleményeket váltották ki, többek között végtelen párbeszédnek születtek az írásban tárgyalt mélyreható, előttünk álló változásokkal kapcsolatban. (Például Bill Joy a *Wired*-ben „Miért nincsen szüksége ránk a jövőnek?” címmel megjelent cikke inspirálta „ígéret kontra veszély” vita, amit az előző fejezetben tekintettem át.) Az elképzeléseimre érkező vélemények több szinten magyarázták, hogy az általam bemutatott változások miért nem történhetnek meg. Az alábbiakban azokat a legfontosabb kritikákat foglalom össze, amelyekre válaszolok ebben a fejezetben:

- A „Malthus-kritika”: *Hiba az exponenciális trendeket kivetíteni a meghatározhatatlan jövőbe, hiszen ezek a trendek nyilvánvalóan úgyis kifognak az erőforrásaikból, és exponenciális növekedésük nem folytatódhat. Továbbá nem lesz elég energiánk működtetni a megjósolt rendkívül sűrű jövőbeli számítástechnikai platformokat, és még ha sikerülne is, azok úgy felforrósodnának, akár a Nap.* Az exponenciális tendenciák egyszer elérnek egy aszimptotát, ám a számítástechnikához és kommunikációhoz szükséges alapanyagok és energiaforrások az egy számítógépre jutó bitben számolva olyan aprók, hogy ezek a tendenciák folytatódnak addig a pontig, amikor a nem biológiai intelligencia már több trilliószor hatékonyabb lesz a biológiai formánál. A reverzibilis számítás több nagyságrenddel csökkentheti az energiafelhasználást és könnyítheti a hőelvezetést. A számítástechnikában a „hideg” számítógépekre váltás olyan nem biológiai platformokat fog létrehozni, amelyek hihetetlen mértékben meghaladják majd a biológiai intelligencia teljesítményét.
- A „szoftveres kritika”: *Exponenciális eredményeket érünk el a hardver területén, de a szoftver elakadt a kátyúban.* Bár a szoftverfejlesztés megkettőződési ideje hosszabb, mint a számítástechnikai hardveré, a szoftverek hatékonysága és komplexitása is hatványozódik. A keresőprogramoktól a játékokig a szoftveralkalmazások ma olyan mesterségesintelligencia-technológiát használnak, amelyről egy évtizede még csupán kutatási projektekből olvashattunk. A szoftverek általános komplexitása, hatékonysága és algoritmikus problémamegoldó képessége is jelentősen megnőtt. Továbbá hatékony

munkahipotézisünk van arra, miként teremtsük újra az emberi intelligencia képességeit egy gépben: visszafejtéses tervezéssel megragadhatjuk az agy működési elveit, és alkalmazhatjuk őket az agyhoz hasonló képességű számítástechnikai platformokban. Az agy visszafejtésének minden aspektusa felgyorsul: úgy az agyletapogatás térbeli és időbeli felbontása, az agy összes működési szintjének ismerete, mint az idegsejtek és agyi területek realiztikus modellezése, illetve szimulálása.

- Az „analóg feldolgozás kritikája”: *A digitális számítástechnika túl merev, mert a digitális bitek csak két állapotot ismernek. A biológiai intelligencia többnyire analóg módon működik, így finom fokozatokban is képes a számításra.* Igaz, hogy az emberi agy digitálisan vezérelt analóg módszereket használ, de ilyen megoldásokat a gépeinkben is alkalmazhatunk. Azonkívül a digitális számítástechnika bármilyen kívánt pontossági szinten szimulálhatja az analóg műveleteket, míg ennek az ellenkezője nem igaz.

- Az „idegi feldolgozás komplexitásának kritikája”: *Az idegsejtek közötti kapcsolatok információs folyamatai (axonok, dendritek, szinapszisok) sokkal komplexebbek, mint a neurális hálóknban használt leegyszerűsített modellek.*

Való igaz, azonban az agyi területek szimulációja során nem használunk ilyen leegyszerűsített modelleket. Létrehoztuk az idegsejtek és idegi kapcsolatok valóságghú matematikai modelljeit és számítógépes szimulációit, amelyek megragadják a biológiai megfelelőjük nemlineáris és aprólékos folyamatait. Továbbá felfedeztük, hogy maguknak az információfeldolgozást végző agyi területeknek a komplexitása gyakorta kisebb, mint a bennük lévő idegsejtek felépítése. Ma már az emberi agy több tucat területének létezik hatékony modellje és szimulációja. Az emberi genom csak körülbelül harminc-százmillió byte-nyi tervinformációt tartalmaz, ha a redundanciát is számításba vesszük, így az agy tervadatai kezelhető szinten mozognak.

- A „mikrotubulusok és a kvantumszámítás kritikája”: *Az idegsejtek mikrotubulusai alkalmasak kvantumszámításra, és ez a kvantumszámítás a tudat előfeltétele. Egy „személyiség” feltöltéséhez meg kellene ragadnunk a személyiség pontos kvantumállapotát.* Nincsen bizonyíték, ami alátámasztaná ezeket az állításokat. Még ha igazak is volnának, semmi sem gátolja a kvantumszámítást a nem biológiai rendszerekben. Rendszeresen használunk kvantumhatásokat a félvezetőkben (például a tranzisztorok alagútdiódáiban), és a gépi alapú kvantumszámítás is fejlődik. A pontos kvantumállapot megragadásával kapcsolatban annyit mondhatok, én is egészen más kvantumállapotban vagyok, mint akkor, amikor elkezdtem leírni ezt a mondatot. Akkor tehát most már egy másik ember vagyok? Talán így igaz, ám ha valaki megragadta volna az állapotomat egy perccel ezelőtt, az adott információra alapuló feltöltés sikeresen átmenne a „Ray Kurzweil” Turing-teszten.

- A „Church–Turing-tézis kritikája”: *Bizonyítható, hogy széles a köre azoknak a problémáknak, amelyeket egy Turing-gép nem képes megoldani. Az is bizonyítható, hogy a Turing-gépek képesek bármilyen lehetséges számítógépet emulálni (azaz létezik olyan Turing-gép, amely minden olyan feladatot meg tud oldani, amely számítógéppel megoldható). Következésképpen a számítógép által megoldható problémák száma korlátozott. Ám az emberek képesek megoldani ezeket, így hát a gépek soha nem tudják majd utánozni az emberi intelligenciát.* Az emberek általában nem képesek a gépeknél jobban megoldani ezeket a „megoldhatatlan” problémákat. Az emberek bizonyos esetekben értelmesen találhatnak a megoldást illetően, de a gépek is képesek ugyanerre, és gyakran

gyorsabban is teszik ezt.

- A „hibaszázalék kritikája”: *A számítógéprendszerek komplexitásuk növekedésével együtt egyre riasztóbb mértékben követnek el katasztrofális hibákat. Thomas Ray azt írja, hogy „feszégetjük a hagyományos módszerekkel hatékonyan megtervezhető és megépíthető dolgok határait.”* Egyre komplexebb rendszereket fejlesztünk ki a kritikusan célirányos feladatok elvégzésére, és a rendszerek hibaszázaléka nagyon alacsony. Ám a tökéletlenség minden komplex folyamat velejárója, és ez alól az emberi intelligencia sem kivétel.

- A „»kötöttség« kritikája”: *Az energiaipar, a közlekedés és hasonló területek átható és komplex fenntartórendszerei (és ezek hatalmas beruházási igénye) gátolják az innovációt, így megakadályozzák a szingularitás technológiáinak megjósolt, gyors ütemű változását.* En kifejezetten az információs folyamatok exponenciális gyarapodásáról beszéltem a kapacitás és ár–teljesítmény-arány tekintetében. Már az információs technológia minden területén láttunk gyors paradigmaváltásokat, amelyeket egyetlen kötöttség jellegű jelenség sem gátolt meg (az internet és a telekommunikáció hatalmas infrastrukturális beruházásai ellenére). Még az energia- és közlekedési szektorok is forradalmi változásokat várhatnak a nanotechnológia-alapú újításoktól.

- Az „ontológiai kritika”: *John Searle több változatban is bemutatja az általa kigondolt kínaiszoba-analógiát. Az egyikben egy ember egy szobában ül, és – számára érthetetlen – kínai nyelvű kérdésekre kell válaszolnia. Ehhez kap egy angol nyelven írt szabályrendszert, ezt követve adja meg a válaszokat. A férfi látszólag kompetens módon, kínai nyelven válaszolja meg a kérdéseket, „valójában azonban csupán mechanikusan követ egy programot. Tehát valójában nem beszéli a kínai nyelvet, és nem tudatosan teszi, amit tesz”. Searle szerint a szobában tartózkodó „ember” nem ért semmit, hiszen végeredményben „egyszerű számítógép”. Így hát nyilvánvalóan a számítógépek nem értik, amit cselekszenek, hiszen csupán szabályokat követnek.* Searle kínai szobájának érvei eredendően tautologikusak, hiszen azt a végkövetkeztetést veszik premisszaként, hogy a számítógépek nem rendelkezhetnek valódi tudattal. Searle egyszerű analógiáinak filozófiai bűvészmutatványa részben lépték kérdése. Azt állítja, egyszerű rendszerről beszél, és meg akarja győzni az olvasót, hogy egy ilyen rendszer nem rendelkezhet valódi tudattal. Ám már maga a jellemzés félrevezető. Ahhoz, hogy a kínai szoba rendszere összeegyeztethető legyen Searle feltételezéseivel, legalábbis az emberi agyával megegyező komplexitással kellene bírnia, és ekkor ennek megfelelően az emberi agyával megegyező tudatossággal rendelkezne. Az analógiában szereplő ember a CPU-nak megfelelő elem volna, a rendszer egy kisebb egysége. Bár ez az ember talán nem lenne tisztában vele, a tudata szétszóródna a program egész mintájában és a több milliárd döntésben, amelyeket a program végrehajtásához meg kellene tennie. Csak gondoljunk bele: én értem az angol nyelvet, de az idegsejtjeim nem. Nyelvismeretem így idegátviteli erősségek, szinaptikus rések és idegsejtközi kapcsolatok kiterjedt mintáiban jelenik meg.

- A „gazdag–szegény választóvonal kritikája”: *Valószínű, hogy ezeken a technológiai vívmányokon keresztül a gazdagok olyan lehetőségekhez jutnak majd, amelyekhez az emberiség nagy részének nem lesz hozzáférése.* Ez persze nem újdonság, de szeretném felhívni a figyelmet arra, hogy az ár–teljesítmény-arány folyamatos exponenciális javulásából következően ezek a technológiák igen gyorsan olcsón elérhetővé, majdhogynem ingyenessé válnak.

- Az „állami szabályozás valószínűségének kritikája”: *Az állami szabályozás le fogja*

lassítani és meg fogja állítani a gyorsuló technológiai fejlődést. Bár a törvények gátló ereje fontos kérdés, eddig kevésbé mérhető hatást gyakorolt az e könyvben tárgyalt tendenciákra. Hacsak nem alakul ki egy világméretű totalitáriánus állam, a technikai fejlődés gazdasági és egyéb vonulatai folyamatos fejlődést és növekedést mutatnak majd. Még az összejtutatóhoz hasonló ellentmondásos kérdések is a patakban csillogó kövekhez lesznek hasonlóak: a fejlődés folyamának fénye bevilágítja őket.

- A „teista kritika”: *William A. Dembski szerint „a Ray Kurzweilhez hasonló materialisták... az anyag mozgását és változásait elegendő magyarázatnak tartják az emberi tudat megismeréséhez”. „De a materializmus kiszámítható, míg a valóság nem az. A kiszámíthatóság a materializmus legfőbb erénye... és az üresség a legfőbb bűne.”* Az anyag és energia komplex rendszerei nem kiszámíthatóak, hiszen nagyszámú, előre nem megjósolható kvantumeseeményen alapulnak. Még ha elfogadjuk is a kvantummechanika „rejtett változós” értelmezését (amely szerint a kvantumeseemények csak látszólag kiszámíthatatlanok, és valójában mérőműszerekkel kimutathatatlan rejtett változók működtetik őket), a komplex rendszerek viselkedése még mindig gyakorlatilag kiszámíthatatlan volna. És minden tendencia azt mutatja, hogy egyértelműen a biológiai másikkal egyenlő komplexitású nem biológiai rendszerek felé haladunk.

Ezek a jövőbeli rendszerek nem lesznek „üresebbek”, mint maguk az emberek, és sok esetben az emberi intelligencia visszafejtésén alapulnak majd. Nem kell az anyag- és energiaminták képességein túl keresgélnünk ahhoz, hogy megmagyarázzuk az emberi intelligencia képességeit.

- A „holista kritika”: *Michael Denton idézve, az élőlények „önszerveződők, (...) önreferenciálisak, (...) önmásolók, (...) reciprokálisak, (...) önformálók és (...) holisztikusak”. Ezeket az organikus formákat csak biológiai folyamatok hozhatják létre, és ezek a formák „adják a lét változatlan, (...) beláthatatlan és mélyreható valóságát”.*^[720] Való igaz, hogy a biológiai felépítés mélyen gyökerező alapelvek kifejeződése és terméke, ám a gépek képesek alkalmazni – már alkalmazzák is – ugyanezeket az alapelveket, és nincsen semmi, ami meggátolná a nem biológiai rendszereket abban, hogy megragadják a biológiai világ emergens tulajdonságait.

Már számtalan olyan vitában és párbeszédben vettem részt különböző fórumokon, amelyek megválaszták ezeket a felvetéseket. Ennek a könyvnek az egyik célja kimerítő választ adni az általam megismert legfontosabb kritikákra. A megvalósíthatóság és elkerülhetetlenség fenti kritikáira adott replikáim már a könyv számos fejezetében megjelentek, de ebben a fejezetben részletesen reagálok az érdekesebb kifogásokra.

A hitetlenségből fakadó kritikák

Az általam leírt jövő talán legőszintébb kritikája egyfajta kételkedés abban, hogy ezek a mélyreható változások valóban megtörténhetnek. A vegyész Richard Smalley például nem hisz abban, hogy a nanobotok képesek lennének küldetéseket teljesíteni az emberi véráramban, és „ostobaságnak” titulálja az elképzelést. Ám a tudósokat etikai érzékük eleve óvatosságra inti a jelenlegi munka távlati lehetőségeit illetően, és ez az egyébként érthető és ésszerű óvatosság sajnálatos módon gyakran arra készteti a kutatókat, hogy elhatárolják magukat a tudomány és technológia távoli jövőre gyakorolt hatásának tanulmányozásától. Az egyre gyorsuló paradigmaváltás tükrében ez a megrögződött pesszimizmus nem segíti a társadalom ügyét, különösen, amikor azt akarjuk felmérni, mire lesz képes

a tudomány az előttünk álló évtizedekben. Gondoljunk csak bele, milyen hihetetlen lenne a jelenkor technológiája az egy évszázaddal ezelőtt élt emberek szemében!

Egy ehhez kapcsolódó kritika arra az elképzelésre épít, hogy nehéz megjósolni a jövőt; erre bőségesen találunk bizonyítékot, elég megnéznünk a régebbi korok jövőkutatóinak megannyi hamis jóslatát. Valóban rendkívül nehéz, vagy egyenesen lehetetlen megjósolni, a jövőben melyik cég vagy termék válik sikeressé. Ugyanebbe a nehézségbe ütközünk, amikor arra keresünk választ, vajon melyik műszaki megoldás vagy szabvány marad fenn az idők során. (Például vajon hogyan vészelik át az elkövetkező évszázadot a WiMAX, CDMA és 3G drót nélküli kommunikációs protollok?) Mindazonáltal, mint azt már bőségesen kifejtettem ebben a könyvben, az információs technológiák általános hatékonyságát tekintve meglehetősen precíz és megjósolható exponenciális tendenciákat találunk (például az ár–teljesítmény-arány, a sáv szélesség, és egyéb kapacitásmérő jelzőszámok formájában). Példának okáért, a számítástechnika ár–teljesítmény-arányának elegáns exponenciális íve már csaknem egy évszázada tart. Ha csak azt nézzük, hogy az egy bit kiszámításához vagy továbbításához szükséges anyag és energia minimális mennyisége köztudottan milyen elenyésző mértékű jelenleg, magabiztos jóslatokat tehetünk az információs technológiai trendek folytatódásáról, legalább a következő évszázadra vonatkozóan. Továbbá megbízható számításokat végezhetünk az említett technológiák jövőbeli kapacitásaival kapcsolatban.

Gondoljunk csak bele, hogy egy mozgó gázmolekula pályáját kiszámítani lényegében lehetetlen, de a(z egymással kaotikus kölcsönhatásban lévő molekulákból álló) teljes gázmennyiség bizonyos tulajdonságait megbízhatóan megjósolhatjuk a termodinamika törvényeinek segítségével! Ennek megfelelően nem lehetetlen megbízható jóslatokat készíteni egy adott projekt vagy vállalat eredményeire vonatkozóan sem, és a (sok kaotikus tevékenységből álló) általános információs technológia kapacitása is megbízhatóan előre jelezhető a gyorsuló megtérülések törvényén keresztül.

Úgy látom, ez a hitetlenkedés szítja a gépeknek – a nem biológiai rendszereknek – az emberekhez való hasonlításakor felcsapó tiltakozás dühét is. Az emberi gondolkodás története során rendszerint elutasításra kerültek azok a gondolatok, amelyek látszólag megingatták a fajunk különlegességébe vetett hitünket. Sokan ellenálltak Kopernikusz felfedezésének, miszerint a Föld nem a világegyetem középpontja, ahogyan Darwinnak sem hitték el, hogy alig vagyunk fejlettebbek a többi emberszabásúnál. Az az elképzelés, hogy a gépek elérhetik, vagy akár meg is haladhatják az emberi intelligencia szintjét, most látszólag ismét megkérdőjelezi az ember létjogosultságát.

Véleményem szerint van valami alapvetően különleges az emberi lényekben. Mi voltunk az első faj a Földön, amelyben egyszerre jelent meg a kognitív funkció és a hatékony, a többivel szembefordítható végtagnyúlvány (a hüvelykujj), és ezért képesek voltunk létrehozni egy olyan technológiát, amely egyszer majd a saját horizontunkat is kitágítja. A Földön rajtunk kívül egyetlen faj sem volt képes erre. (Pontosabban mondva, mi vagyunk az egyetlen fennmaradó faj ebben az ökológiai fülkében; más, hasonló fajok – mint például a Neander-völgyiek – nem maradtak fenn.) Továbbá, mint azt a hatodik fejezetben is kifejtettem, eddig még egyetlen más civilizációt sem találtunk az univerzumban.

A Malthus-kritika

Az exponenciális tendenciák nem tartanak örökké. A végső korlátokba ütköző exponenciális trendek klasszikus példája a „nyulak Ausztráliában” metaforája. Egy befogadó élőhelyre érkező faj egyedszáma egészen addig exponenciális ütemben növekszik, amíg növekedése el nem éri a környezet

fenntartókéességének korláta. Ennek a határnak a megközelítése összességében még a populációt is csökkentheti – például az emberek, felfigyelvén egy terjedő kártevőre, ki akarják azt irtani. Egy másik gyakori példa a mikrobáé, amely exponenciálisan terjed egy állati testben, amíg el nem ér egy határt: a gazdatest eltartókéességének felső határát, egy immunrendszeri válaszreakciót, vagy a gazdatest halálát. Az emberi népességszám is határ felé közeledik. A fejlettebb nemzetekben élő családok elsajátították a születésszabályozási módszereket, és relatíve magas igényszintet alakítottak ki a gyermekeik ellátása tekintetében. Ennek eredményeképpen a népességgyarapodás a fejlett világban többé-kevésbé stagnál. Eközben a legtöbb fejlődő országban még mindig a társadalmi biztonság ígéretét látják a nagy családban, abban bízva, hogy legalább egy gyermek életben marad és támogatni fogja idős korú szüleit. Ám mivel a gyorsuló megtérülések törvénye egyre szélesebb kör számára biztosítja a gazdasági hasznot, a népesség egyetemes növekedése lassul.

Akkor tehát az információs technológiák terén tapasztalt exponenciális tendenciák is hasonló akadályba ütköznek majd?

A válasz igen, de még azelőtt megtörténnek a könyvben tárgyalt mélyreható változások. Mint azt a harmadik fejezetben megírtam, az egy bit kiszámításához vagy továbbításához szükséges anyag és energia mennyisége elenyésző mértékű.

A reverzív logikai kapuk használatával csak annyi energiabevitelre van szükségünk, ami az eredmények továbbadásához és a hibajavításhoz szükséges. Egyébként az adott számítás közben felszabaduló hő visszaforgatva rögtön a következő számítás elvégzésére fordíthatjuk.

Az ötödik fejezetben már szoltam róla, hogy a nanotechnológia-alapú műszaki megoldásoknak – gyakorlatilag minden területen, a számítástechnikában, a kommunikációban, a gyártásban és közlekedésben – jóval kevesebb energiára lesz szükségük, mint manapság.

A nanotechnológia a megújuló energiaforrások, például a napfény felhasználásában is segédkezni fog. 2030-ban napenergiával elérhetjük harmincbillió wattos összenergia-szükségleti tervünket, amennyiben felfogjuk a Földet érő napenergia mindössze 0,03 százalékát (három tízezred részét). Ez hihetetlenül olcsó, pehelysúlyú és hatékony nanomegoldásokkal ellátott napelemekkel fog sikerülni, amelyek nanoüzemanyag-celláikban tárolják és osztják szét a felfogott energiát.

A gyakorlatilag korlátlan korlátok. Mint arról már a harmadik fejezetben is esett szó, egy optimálisan szervezett, 1 kg súlyú, reverzibilis logikai kapukat alkalmazó számítógép körülbelül 10^{25} atomból áll, és körülbelül 10^{27} bit tárolására képes. Csak a részecskék közötti elektromágneses kölcsönhatásokat tekintve legalább 10^{15} számításra használható állapotváltozás történik bit per másodpercenként, ami a legideálisabb 1 kilogrammos „hideg” számítógépben körülbelül 10^{42} számítást eredményez másodpercenként. Ez körülbelül 10^{16} -szorosa a ma élő összes biológiai agy képességének. Ha végső számítógépünk netán fel is melegedhet, akkor még tovább növelhetjük a kapacitását legalább 10^8 -szorosára. És ugyebár számítástechnikai erőforrásainkat nyilvánvalóan nem fogjuk egy kilogramm anyagra korlátozni, hanem végül a Földön és a Naprendszerben található anyag és energia jelentős részét bevetjük ebből a célból, aztán terjeszkedünk.

Az egyes paradigmák egyszer egy korláthoz érnek. Úgy ítéljük, hogy a Moore-törvény (a lapos nyomtatott áramkörön található tranzistorok méretének csökkenésére vonatkozó szabály) az elkövetkező két évtizedben eléri a határát. A Moore-törvény leáldozásának időpontja egyre távolodik. Először 2002-re jósolták, de az Intel szerint 2022-ig nem fog megtörténni.

Azonban ahogyan azt a második fejezetben is leírtam, amikor egy bizonyos számítástechnikai paradigma eléri a felső határát, a kutatási kedv és a nyomás megnövekedik és létrehoz egy új

paradigmát. Ez a számítástechnika százéves, exponenciális fejlődésében már négyszer megtörtént (az elektromágneses számológépektől a reléalapú számítógépekig, aztán onnan a vákuumcsövekig, majd az önálló tranzistoroktól a nyomtatott áramkörökig). Magunk mögött hagyunk már megannyi mérföldkövet a számítástechnika következő (hatodik) paradigmájáig, a háromdimenziós, önszervező, molekuláris szintű áramkörökig vezető úton. Így egy adott paradigma hamarosan bekövetkező veszte nem parancsol megálljt a fejlődésnek.

Az információs technológiának vannak határai, de ezek hihetetlenül tágak. A Naprendszerünkben található anyag és energia teljes számítókapacitását legalább 10^{70} cps-re becsültem (lásd a hatodik fejezetet). Mivel az univerzumban legalább 10^{20} csillagot találunk, körülbelül 10^{90} cps-sel számolhatunk, ami igazolja Seth Lloyd független elemzését. Tehát igen, vannak korlátok, csak éppen nem nagyon korlátoznak minket.

A szoftveres kritika

A hatékony mesterséges intelligencia és így a szingularitás megvalósíthatóságának gyakori kritikája a kvantitatív és kvalitatív tendenciák szétválasztásánál kezdődik. Ez az érvelés lényegében tudomásul veszi, hogy bizonyos nyers képességek, mint a memóriakapacitás, a processzor sebesség és a kommunikációs sáv szélességek valóban exponenciálisan bővülnek, de ugyanakkor azt állítja, hogy a szoftver (azaz a módszerek és algoritmusok) lemarad ezektől.

Ez a hardver kontra szoftver kifogás, amely jelentős súlyt képvisel a vitában. A virtuális valóság úttörője, Jaron Lanier például az én álláspontomat és más úgynevezett „totalista kibernetikusokét” úgy jellemzi, mint amely szerint majd valami előre nem látható úton, „deus ex machina” módjára találjuk fel a megfelelő szoftvereket.^[721] Ez az érvelés természetesen nem veszi figyelembe az intelligenciaszoftver előállításának általam leírt specifikus és részletes forgatókönyvét. Az emberi agy visszafejtése, amely sokkal távolabbra mutat annál, mint azt Lanier és más kritikusok gondolnák, olyan mértékben kibővíti a mesterséges intelligencia eszközkészletét, hogy az emberi intelligencia rejtett önszervező módszereit is magába olvasztja majd. Hamarosan visszatérek a tárgyhoz, de először lássunk néhány további alapvető tévhitet a szoftverek állítólagos fejleszthetetlenségével kapcsolatban!

A szoftverek stabilitása. Lanier a szoftvereket lényegében „lomháknak” és „törékenyeknek” nevezi, és hosszasan taglalja a használatuk során tapasztalt nehézségeket. Szerinte „szinte lehetetlen a számítógépeket rávenni, hogy megbízható, de megváltoztatható módon végezzenek el meghatározott feladatokat anélkül, hogy lefagynának, vagy biztonságtechnikai kérdések merülnének fel”.^[722] Nem célom védeni minden szoftvert, de az egyszerűen nem igaz, hogy a komplex szoftverek alapvetően gyengék vagy katasztrofális összeomlásra hajlamosak volnának. A komplex célorientált szoftverek nagyon kis százalékból omlanak össze, ha egyáltalán összeomlanak: például egyre több kifinomult program vezérel repülőgépeket, figyel intenzív osztályon fekvő betegeket, irányít intelligens fegyvereket, vezérel automatikus mintafelismerésre támaszkodva több milliárd dolláros befektetéseket kockáztatítóke-alapokban, és lát el további funkciókat.^[723] Nem tudok olyan repülőgép-szerencsétlenségről, amelyet egy automatizált leszállószoftver hibája okozott volna, ám ugyanez nem mondható el az emberi megbízhatóságról.

A szoftverek válaszüze. Lanier arról panaszkodik, hogy „a számítógépek felhasználói

interfészei lassabban reagálnak a felhasználói eseményekre, például billentyűnyomásra, mint tizenöt évvel ezelőtt... Hol romolhatott el a dolog?”^[724] Kíváncsi vagyok, Lanier milyen sikerrel tudna használni ma egy régi számítógépet. Még ha a beállítási nehézségeket félretesszük is (ami egészen más lapra tartozik), Lanier nem veszi figyelembe, mennyire lomhák, ormótlanak és korlátozottak voltak ezek a rendszerek. Próbáljunk csak meg a mai színvonalnak megfelelő munkát végezni valamelyik húszéves személyszámítógép-szoftverrel! Egyszerűen nem igaz, hogy a régi szoftverek bármilyen kvalitatív vagy kvantitatív értelemben jobbak lettek volna.

Bár mindig lehetséges silány minőségben megtervezett programokat találni, a késleltetett válaszidőket általában az új tulajdonságok és új funkciók eredményezik. Ha befagyasztanánk egy adott szoftver funkcióinak fejlesztését és az újabbak hozzáadását, a számítási sebesség és a memória exponenciális növekedése miatt hamarosan megszűnne a szoftverek késleltetett válaszi-deje. Ám a piac mindörökké bővülő kapacitást követel. Húsz évvel ezelőtt nem voltak keresőprogramok vagy más módok, amelyekkel a világhálózhoz lehetett kapcsolódni (valójában világháló sem volt), csak primitív nyelvi vagy multimédiás eszközök, formattálás, és így tovább. Így hát a funkcionalitást mindig a megvalósíthatóság határozza meg.

A több évre vagy évtizedre visszatekintő nosztalgikus szoftverkép olyan, mint a legtöbb ember idilli elképzelése arról, milyen volt, amikor a gépek még nem „telepedtek rá” le a mindennapjainkra. Talán tényleg szabadabban élhetett az ember, de hosszú élettartamra nem lehetett számítani, és gyakran érték a szegénység, a betegségek, valamint a szerencsétlenségek okozta fájdalmak.

A szoftverek ár–teljesítmény-aránya. Az ár és teljesítmény tekintetében az összehasonlítások drámai változásokat mutatnak. Vegyük a 145. oldalon található, beszédfelismerő szoftvereket tartalmazó táblázatot! 1985-ben ötezer dollárba került egy ezerszavas szótárt tartalmazó szoftvercsomag, amely nem volt képes a folytonos beszéd felismerésére, három óráig kellett tanítani a felhasználó hangjára és relatíve gyenge találati pontossággal működött. 2000-ben mindössze ötven dollárért vehettünk százezer szavas szoftvercsomagot, amely élőbeszéd-felismerővel rendelkezett, csak öt percig kellett tanítani, drasztikusan feljavított pontossággal működött, lehetővé tette a természetes nyelv felismerését (szerkesztési parancsokra és egyéb célokra) és további tulajdonságokkal is bírt.^[725]

A szoftverfejlesztés produktivitása. Na és a szoftverfejlesztés? Én magam már negyven éve foglalkozom szoftverfejlesztéssel, így van némi rálátásom a témára. A szoftverfejlesztés produktivitásának megkettőződési idejét körülbelül hat évre becsülöm. Ez lassabb, mint a processzorok ár–teljesítmény-arányának felezési ideje, ami napjainkban jelenleg megközelítőleg egy év. Azonban a szoftverek produktivitása exponenciálisan növekszik. A ma elérhető fejlesztői eszközök, osztálykönyvtárak és támogató rendszerek sokkal hatékonyabbak, mint az évtizedekkel ezelőttiek. Jelenlegi projektjeimben mindössze három- vagy négyfős csapatok néhány hónap alatt képesek arra az eredményre, amelyek elérésén huszonöt évvel ezelőtt tucatnyi vagy még több ember legalább egy évig dolgozott volna.

A szoftverek komplexitása. Húsz éve a szoftverprogramok tipikusan ezer-tízezer sorból álltak. Ma az üzleti célú programok (például az ellátásilánc-vezérlő, gyári automatizáló, reptéri jegyfoglalási és biokémiai szimulációs rendszerek) sokmillió vagy még annál is több sort számlálnak. A legnagyobb védelmi rendszerek, mint például a Joint Strike Fighter, több tízmillió sorból állnak.

A szoftvervezérlő szoftverek komplexitása is sebesen nő. Az IBM úttörő szerepet vállal az autonóm számítástechnika területén, amelyben a rutinszerű információs technológiai támogatófunkciók teljes automatizáltságot nyernek majd.^[726] Ezeket a rendszereket a saját viselkedési modelljeikkel fogják programozni, és az IBM szerint képesek lesznek „önkonfigurálásra, öngyógyításra, önoptimalizálásra és önvédelemre”. Az autonóm számítástechnika támogatószoftverjei több tízmillió kódsorból állnak majd (melyeknek minden sora több tíz byte-nyi információt tartalmaz). Így az információs komplexitást tekintve a szoftver már meghaladja az emberi genomban és támogató molekuláiban tárolt felhasználható információ mennyiségét.

Am az egy programban található információ mennyisége nem a komplexitás legjobb mérőfoka. Egy program ugyanis lehet hosszú, de talán tele van haszontalan információval. Természetesen ugyanezt lehet elmondani a nagyon kevésbé hatékonyan kódolt genomról is. Történtek próbálkozások a szoftverkomplexitás mértékének meghatározására: például a Nemzeti Szabvány és Technológiai Intézet számítástechnika-kutatói, Arthur Watson és Thomas McCabe kidolgozták a Ciklomatikus Komplexitás Metrikát.^[727] Ez a metrika a programlogika komplexitását méri, figyelembe véve az elágazási és döntési pontok szerkezetét. Az indexek által mért, nem ellenőrzött kutatási eredmény arra enged következtetni, hogy sebesen növekszik a programok komplexitása, bár a megkettőződési idő nyomon követéséhez nem áll elég adat a rendelkezésünkre.

A lényeg viszont az, hogy az iparban ma használt legösszetettebb szoftverrendszerek magasabb komplexitással bírnak, mint az agyi területek neuromorf-alapú szimulációját, valamint az egyes idegsejtek biokémiai szimulációját végző szoftverek. Már képesek vagyunk olyan szoftverkomplexitási szinteket kezelni, amelyek meghaladják az emberi agyban felfedezett párhuzamos, önszerveződő fraktálgörvényszerű modellezéséhez és lemásolásához szükséges komplexitást.

Gyorsuló algoritmusok. A (konstans hardverbe ágyazott) szoftveralgoritmusok sebességében és hatékonyságában drámai előrelépések történtek. Így például a hardver és szoftver egyenrangú felgyorsulásával javult a jelfeldolgozó, mintafelismerő és mesterségesintelligencia-programokba ágyazott alapvető matematikai függvények műszaki megoldásainak ár–teljesítmény-aránya. Ezen javulások mértéke a problémaköröktől függően változó, mindazonáltal általánosnak mondható.

Vegyük például a jelfeldolgozást, amely széles körű és intenzív számítást igénylő feladat úgy a számítógépek, mint az emberi agy számára! A Georgiai Technológiai Intézet kutatója, Mark A. Richards és az MIT tudósa, Gary A. Shaw a jelfeldolgozási algoritmusok trendszerűen növekvő hatékonyságát figyelték meg.^[728] Például ahhoz, hogy mintákat találjunk a jelekben, gyakran meg kell oldanunk különböző, úgynevezett parciális differenciálegyenleteket. Az algoritmus-szakértő Jon Bentley kimutatta, hogy az ezen problémaosztály megoldásához szükséges számítási műveletek száma folyamatosan csökken.^[729] 1945 és 1985 között például egy reprezentatív alkalmazást tekintve (egy elliptikus parciális differenciális megoldását megtalálni egy minden oldalán hatvannégy elemes háromdimenziós rácson), a szükséges műveletek száma háromszázezerszer kevesebb lett. Ez a hatékonyságnövekedés nyelven évi 38%-os javulást jelent (a hardverfejlesztéseket nem számítva).

Egy másik példa az információtovábbítás képessége nem adattovábbításra optimalizált sima telefonvonalakon, ami tizenkét év alatt 300 bit per szekundumról 56 000 bps-re, azaz évente 55%-kal nőtt.^[730] Ezek a javulások részben hardverfejlesztések eredményei, de legnagyobb részben az algoritmusok innovációjának következményei.

Az egyik legfontosabb jelfeldolgozási probléma egy jel frekvenciakomponensekre bontása a

Fourier-transzformáció segítségével, amely a jeleket szinuszhullámok összegeként fejezi ki. Ezt a módszert alkalmazzák a komputerizált beszédfelismerés fejlesztésének élvonalában és egyéb alkalmazásokban is. Az emberi auditív percepció is azzal kezdi a működését, hogy a belső fülben frekvenciakomponensekre bontja a beszédjeleket. Az 1965-ös „gyors Fourier-transzformációra” kidolgozott „radix-2 Cooley–Tukey-algoritmus” körülbelül kétszázal csökkentette az 1024 pontos Fourier-transzformációhoz szükséges műveletek számát.⁴⁷³¹¹ Egy továbbfejlesztett „radix-4” módszer tovább javította az eredményt nyolcszázra. Nemrégiben megjelentek a „wavelet” transzformációk, amelyek képesek tetszőleges jeleket a szinuszhullámoknál komplexebb hullámformák összegeként is kifejezni. Ezek a módszerek tovább növelik a jelek meghatározó komponenseiké történő lebontásának hatékonyságát. A fenti példák nem kivételesek: a legtöbb számítástechnikailag intenzív alapalgoritmus jelentős műveletszám-csökkentéssel esett át. A példák közt említhetjük még a rendezést, keresést, autokorrelációt (és egyéb statisztikai módszereket), valamint az adattömörítést és kitömörítést. Az algoritmusok párhuzamosításában – azaz egy adott módszer több szimultán végezhető módszerre való bontásában – is történtek előrelépések. Mint már korábban kifejtettem, a párhuzamos feldolgozás eredendően alacsonyabb hőmérsékleten történik. Az agy nagymértékű párhuzamos feldolgozást végez, ami által komplexebb funkciókra és gyorsabb reakcióidőkre képes, és az optimális számítástechnikai sűrűségek eléréséhez nekünk is hasznosítanunk kell majd ezt a megközelítést a gépeinkben.

Van egy alapvető különbség is a hardver ár–teljesítmény-arányának javulása és a szoftverhatékonyság javulása között. A hardverfejlesztések meglehetősen következetesek és előrevetíthetők. Az új hardversebességek és hatékonysági szintek elérésével olyan eszközöket nyerünk, amelyekkel az exponenciális fejlődés újabb lépcsőfokára hághatunk. A szoftverfejlesztés lépcsői viszont kevésbé kiszámíthatóak. Richards és Shaw „a fejlesztési idő főregjáratainak” nevezik ezeket a szinteket, mert gyakran egyetlen algoritmikus fejlesztéssel évek hardverfejlesztésének megfelelő eredményt érhetünk el. Ne felejtsük el, hogy csak azért, mert számíthatunk a hardver folyamatosan gyorsuló fejlődésére, attól még nem feltétlenül várhatjuk el a szoftverhatékonyság folyamatos javulását! Mindazonáltal az algoritmikus áttörések haszna jelentősen hozzájárul ahhoz, hogy elérjük az emberi intelligencia emulálásához szükséges általános számítástechnikai hatékonyságot, és az efféle forradalmi újítások száma valószínűleg tovább fog gyarapodni.

Az intelligens algoritmusok végső forrása. Nyomatékosan hangsúlyozni szeretném, hogy igenis létezik egy nagyon határozott terv az emberi intelligencia gépekben való lemásolására: visszafejtjük az emberi agy által használt párhuzamos, kaotikus, önszerveződő és fraktálmódszereket, és a modern számítástechnikai hardverre alkalmazzuk őket. Az emberi agyról és módszereiről alkotott exponenciálisan növekvő tudásanyagot eddig a pontig nyomon követve (lásd a negyedik fejezetet) arra számíthatunk, hogy húsz éven belül részletes modelljeink és szimulációink lesznek a gyűjtőnéven emberi agynak nevezett több száz információfeldolgozó szervről.

Az emberi intelligencia működési elveinek megértése bővíti majd a mesterségesintelligencia-algoritmusokból épített eszközkészletünket. Ha ezeket a módszereket széles körben alkalmazzuk gépi mintafelismerő rendszereinkben, a tervező által előre nem látott kifinomult és komplex viselkedéseket kapunk. Az önszerveződő módszerek nem biztosítanak egyszerű átmenetet a komplex és intelligens viselkedés megteremtéséhez, de ugyanakkor fontos eszközeink, amelyekkel az egyértelműen programozott logikai struktúrák sérülékenysége nélkül növelhetjük a rendszer komplexitását.

Mint már korábban is említettem, az emberi agy maga egy genomból alakul ki, amelyben mindössze

harminc-százmillió byte-nyi hasznos, tömörített információ található. Hogyan lehetséges akkor, hogy egy ilyen kicsiny genomból kifejlődjön egy százbillió kapcsolatot működtető szerv? (Úgy ítélem, csak az emberi agy jellemzéséhez szükséges kapcsolati adatok összessége egymilliószor nagyobb, mint a genomban tárolt információ.)⁽⁴⁷³²⁾ A válasz az, hogy a genom folyamatokat határoz meg, melyek mindegyike kaotikus módszereket (azaz kezdeti véletlenszerűséget, aztán önszerveződést) alkalmaz a reprezentált információ mennyiség bővítésére. Tudjuk például, hogy a kapcsolatok huzalozása nagymértékben véletlenszerű alapokra épül. Amint egy személy találkozik a környezetével, a kapcsolatok és az idegátviteli szintű minták önszerveződnek, hogy jobban reprezentálják a világot, ám a kezdeti struktúrát egy korántsem a végletekig komplex program határozza meg.

Nem hiszem, hogy láncszemről láncszemre fogjuk programozni az emberi intelligenciát valamiféle masszív, szabályalapú szakértői rendszerben.

Arra sem számítok, hogy az emberi intelligencia által képviselt megannyi képesség széles tárháza egy nagyszabású genetikai algoritmusból fog előbukkanni. Lanier jól teszi, hogy aggódik, amikor azt mondja, az ilyen megközelítések elkerülhetetlenül leragadnának valamilyen lokális minimumban (egy olyan tervnél, amely jobb, mint a hozzá nagyon hasonló tervek, de összességében nem a legeslegjobb). Lanier – Richard Dawkinshoz hasonlóan – rámutat, hogy a biológiai evolúció „kihagyta a kereket” (mármint, hogy egy organizmus sem fejlesztett ki ilyen szervet).

Valójában ez nem teljesen igaz – fehérjeszinten léteznek kis, kerékszerű struktúrák, például a bakteriális flagellum ionos motorja, amely alkalmas a háromdimenziós környezetben való közlekedésre.⁽⁴⁷³³⁾ A nagyobb organizmusok esetében a kerekek persze nem túl hasznosak utak nélkül, és ezért nem fejlődtek ki biológiai kerekek a kétdimenziós felszíni közlekedéshez.⁽⁴⁷³⁴⁾ Azonban az evolúció alkotott egy olyan fajt, amely mind a kereket, mind az utat feltalálta, és így végül is a folyamatnak sikerült közvetett módon sok-sok kereket létrehoznia. A közvetett módszerekkel nincsen semmi baj; a tervezésben minduntalan használjuk őket. Valójában még az evolúció is közvetett módon működik (azaz az egyes szintek eredményei alkotják a következő szintet).

Az agy mérnöki visszafejtése nem az egyes idegsejtek lemásolására korlátozódik. Az ötödik fejezetben láthattuk, miként lehet a jelentős, több millió és milliárd idegsejtet tartalmazó agyi területeket funkcionálisan ekvivalens, párhuzamos algoritmusok bevezetésével modellezni. Az ilyen neuromorf megközelítések megvalósíthatóságát néhány tucat agyi terület szimulációjával és modelljével bizonyították. Mint már említettem, ez gyakran azt eredményezi, hogy a számítástechnikai követelmények jelentősen lecsökkennek, ahogyan azt Lloyd Watts, Carver Mead és mások bemutatták.

Lanier azt írja, „ha valaha létezett is komplex, kaotikus jelenség, akkor mi azok vagyunk”. Egyetérték vele, de én nem akadálnak látom ezt. A saját érdeklődési területem a kaotikus számítástechnika, ami a mintafelismerés alapja, amely pedig végül az emberi intelligencia központi kérdése. A káosz része a mintafelismerési folyamatnak – a folyamat vezérelve –, és nincs okunk arra, hogy ne használjuk ezeket a módszereket a gépeinkben úgy, ahogyan a saját agyunkban működnek.

Lanier szerint „az evolúció fejlődött, például a nemek megjelenése folytán, de soha nem talált kitörési utat a lassúságból”. Ám ez a megjegyzés csak a biológiai evolúcióra alkalmazható, és a technológiára nem. Éppen ezért történhetett meg az, hogy meghaladtuk biológiai evolúciónkat. Lanier nem veszi figyelembe az evolúciós folyamat eredendő természetét: azért gyorsul fel, mert minden szint egyre erősebb módszereket állít elő a következő szint létrehozására. Több milliárd év telt el az első biológiai evolúciós lépéstől (az RNS-től) a mai technológiai evolúció sebes fejlődéséig. A világháló csupán néhány év alatt jelent meg, jól láthatóan egy sokkal gyorsabb változás révén, mint mondjuk a kambriumi robbanás. Ezek a jelenségek mind ugyanannak az evolúciós folyamatnak a

részei, amely lassan indult, most relatíve gyorsan zajlik, és néhány évtizeden belül elképesztő sebességre tesz majd szert.

Lanier azt írja: „a mesterséges intelligencia kifejlesztésére irányuló egész vállalkozás egy intellektuális tévedésen alapul”. Amíg a számítógépek nem képesek legalább leképezni az emberi intelligenciát minden dimenziójában, a szkeptikusok mindig mondhatják, hogy a pohár félig üres. Minden új, mesterséges intelligenciával kapcsolatos áttörés félresöpörhető, ha további, el nem ért célokra mutatunk. Pontosan ez bántja a gyakorló MI-kutatót is: ha a mesterségesintelligencia-kutatás eléri az egyik célkitűzését, az eredmény többé már nem esik a mesterséges intelligencia tárgykörébe, hanem mint hasznos általános technikára tekintenek rá. A mesterséges intelligenciát ezért gyakran a meg nem oldott problémák területének tartják.

Am a gépek intelligenciája valóban gyarapodik, és egyre szélesedik azoknak a korábban emberi figyelmet igénylő feladatoknak a skálája, amelyeket képesek megoldani. Mint arról már említést tettem az ötödik és hatodik fejezetben, itt példaként említhetnénk a már ma is működő mesterséges intelligenciák több száz fajtáját.

Ha egyszer létrehozuk az emberi intelligencia teljes modelljét, a gépek ötvözni tudják majd a mintafelismerés rugalmas és kifinomultan emberi szintjeit a gépi intelligencia olyan természetes előnyeivel, mint például a sebesség, a memóriakapacitás és legfőképpen a tudás, valamint a képességek gyors megosztása.

Az analóg feldolgozás kritikája

Sok kritikus, ahogyan a zoológus és evolúciós algoritmusokat kutató Thomas Ray, támadja a hozzám hasonló elméleti gondolkodókat, akik intelligens számítógépekről beszélnek, hiszen szerintük mi „nem látjuk a digitális médium egyedi természetét”.^{[17351](#)}

Először is, tézisem szerint az analóg és digitális módszerek ugyanúgy kombinálódnak majd a mesterséges intelligenciákban, ahogy az emberi agyban is. Például a fejlettebb neurális hálók már az emberi idegsejtek legapróbb részletekre kiterjedő modelljeit alkalmazzák, a nemlineáris analóg aktiválási funkciókkal együtt. Jelentős hatékonysági előnyt jelent az agy analóg módszereinek leképezése. Az analóg módszerek nem a biológiai rendszerek kizárólagos tulajdonságai. Régebben „digitális számítógépeknek” neveztük az új fejlesztéseket, hogy megkülönböztessük őket a második világháború előtt széles körben használt analóg számítógépektől.

Carver Mead munkássága megmutatta, hogy a szilícium alapú áramkörök képesek digitálisan vezérelt, az emlősök neurális köreinek megfeleltethető és valójában azok alapján kifejlesztett analóg áramköröket működtetni. A hagyományos tranzistorok könnyedén újra létrehozzák az analóg módszereket, hiszen ezek alapján véve analóg eszközök. A tranzisztort csak a kimenetét egy küszöbértékkel összehasonlító mechanizmus teszi digitális eszközzé.

Am ami még ennél is fontosabb, nincsen olyan analóg módszerekkel elvégezhető feladat, amelyet a digitális módszerek ne tudnának ugyanolyan jól végrehajtani. Az analóg folyamatokat lehet digitális módszerekkel emulálni (lebegőpontos ábrázolással), míg ennek az ellenkezője nem minden esetben igaz.

Az idegi feldolgozás komplexitásának kritikája

Egy másik gyakori kritika az, hogy az agy biológiai felépítésének finom részletessége túl összetett

ahhoz, hogy nem biológiai technológia útján modellezni és szimulálni lehessen. Például Thomas Ray azt írja:

„Az agy, illetve az összetevőinek szerkezete és funkciója nem választható szét egymástól. A keringési rendszer életben tartja az agyat, de hormonokat is szállít, amelyek szerves részei az agy kémiai információfeldolgozó funkciójának. A idegsejtek hárttyája olyan szerkezeti tulajdonság, amely meghatározza az idegsejt határait és integritását, de egyben felület is, amelyen a depolarizáció jeleket továbbít. A szerkezeti és létfenntartó funkciók tehát nem különíthetők el az információkezeléstől.”^[736]

Ezt követően Ray hosszan részletezi az agy „kémiai kommunikációs mechanizmusainak széles körét”.

Valójában ezeket a tulajdonságokat könnyen modellezhetjük, és ezen a területen már komoly eredményeket értünk el. A közvetítő nyelv a matematika, és a matematikai modellek megfelelő nem biológiai mechanizmusokra való lefordítása (ahogy az eredeti analóg üzemmódú tranzistorokat használó számítógép-szimulációk és áramkörök ezt példázzák is) viszonylag egyértelmű folyamat. A hormonokat szállító keringési rendszer például egy rendkívül alacsony sávszélességű jelenség, amelyet nem nehéz modellezni és lemásolni. Az adott hormonok és egyéb vegyületek szintje által befolyásolt paraméterértékek egyszerre rengeteg szinapszisra vannak hatással.

Thomas Ray azzal zárja az érvelését, hogy „egy fémből készült számítógépes rendszer alapvetően más dinamikus tulajdonságokkal rendelkezik, és pontosan soha nem képezheti le az agy működését”. Ha figyelemmel kísérjük a neurobiológia kapcsolódó területein – az agyletapogatáson, az idegsejtek és neurális területek modellezésén, a neuroelektronikus kommunikáción, az idegi implantátumok terén és egyéb kísérleti területeken – történő kutatásokat, láthatjuk, hogy a biológiai információfeldolgozás működésének lemásolása bármilyen kívánt pontossági szintet elérhet. Más szóval a lemásolt működés lehet „elég jó másolat” ahhoz, hogy elérjen bármilyen elképzelhető célt – mondjuk, hogy átmenjen a Turing-teszten. Továbbá láthatjuk, hogy a matematikai modellek hatékony működtetése lényegesen kisebb számítástechnikai kapacitást igényel, mint amit a biológiai idegsejtcsoportok modellezése elméletileg megkívánna. A negyedik fejezetben áttekintettem néhány ilyen agyterületi modellt (Watts auditív területeit, a cerebellumot és egyebeket).

Agyi komplexitás. Thomas Ray többek között azt is állítja, hogy nehézségünk támadhat egy „több milliárd soros kódnak” megfelelő rendszer megalkotásával, amely komplexitási szintet az emberi agynak tulajdonítja. Ez a szám azonban fel van nagyítva, mert mint láttuk, az agyunk egy mindössze harminc-százmillió byte egyedülálló információt tartalmazó genomból (nyolcszázmillió byte tömörítés nélkül, de a tömörítés egyértelműen elképzelhető a nagymértékű redundancia miatt) alakult ki, aminek talán kétharmada írja le az agy működési elvét. Éppen az önszerveződő folyamatok azok, amelyek hordozzák a véletlenszerűség elemeit (miközben a való világ felé is nyitnak), ami képes viszonylag kevés tervinformációt kiterjeszteni az érett emberi agy által képviselt több billiárd byte-nyi információra. Hasonlóképpen, az emberszintű intelligencia megalkotása egy nem biológiai entitásban nem egy több milliárd szabályból vagy sorból álló kód alapján működő, masszív szakértő rendszer létrehozását jelenti, hanem sokkal inkább egy tanulni képes, kaotikus, önszervező, biológiai alapon működő rendszerét.

Ray folytatja: „Mérnökeink talán felvetik a fullerénkapcsolókkal működő nanomolekuláris

eszközök, vagy akár a DNS-szerű számítógépek gondolatát. Azonban biztosan nem gondolnak az idegsejtekre. Az idegsejtek csillagászati méretű szerkezetek a mi kiindulási alapnak vett molekuláinkhoz képest.”

Én is éppen ezt szeretném hangsúlyozni. Az agy visszafejtésének célja nem az idegsejtek emésztő vagy egyéb ormótlan folyamatainak a lemásolása, hanem a legfontosabb információfeldolgozó módszereik megértése. Ennek megvalósíthatóságát már több tucat mai projektben megfigyelhettük. A sikeresen emulált idegsejtcsoportok komplexitása nagyságrendekkel növekszik, de ezzel együtt minden egyéb technológiai képességünk is gyarapodik.

A számítógépek eredendő dualitása. A Redwood Agykutató Intézet tudósa, Anthony Bell két kifogást emel az agy számítástechnika általi modellezésével és lemásolásával szemben. Először is kijelenti, hogy a számítógépek eredendően kettős entitások, amelyek fizikai felépítése úgy van kialakítva, hogy ne akadályozza a számításokat kivitelező logikai felépítést. Empirikus megfigyelés alapján kijelenthetjük, hogy az agy nem duális entitás. A számítógép és programja két külön dolog, de az agy és az elme szétválaszthatatlan egymástól. Az agy ennél fogva nem gép, más szóval nem egy véges modell (vagy számítógép), amelyet tárgyi síkon úgy hozunk létre, hogy fizikai megtestesülése ne keveredjen ellentmondásba a modell (vagy program) végrehajtásával.^[737]

Ezt az érvelést könnyedén megcáfolhatjuk. A számítógépben a program és a számolást végző fizikai megtestesülés szétválaszthatósága nem hátrány, hanem éppenséggel előny. Először is, vannak elektronikus eszközeink, melyeknek az áramköreikben a „számítógép és program” nem két külön dolog, hanem egy és ugyanaz. Ezek az eszközök nem programozhatóak, hanem egy specifikus algoritmuskészletre vannak huzalozva. Nem csak az olvasható memóriában tárolt szoftverrel („firmware-rel”) rendelkező számítógépekről beszélek, amilyenek egy mobiltelefonban vagy zsebszámítógépben találhatók. Egy ilyen rendszerben az elektronika és a szoftver még akkor is duálisnak tekinthető, ha a programot nem lehet könnyedén megváltoztatni.

Valójában inkább az egyáltalán nem programozható, célorientált logikával rendelkező rendszerekre gondolok – mint az alkalmazásspecifikus integrált áramkörök (amelyeket például kép- és jelfeldolgozásra használnak). Ez az algoritmusok működtetésének költséghatékony módja, és számos elektronikus fogyasztási cikk használ ilyen áramköröket. A programozható számítógépek költségesebbek, ugyanakkor rugalmasságot biztosítanak, ami változtathatóvá és fejleszthetővé teszi a szoftvert. A programozható számítógépek képesek lemásolni bármilyen célorientált rendszer működését, többek között az idegi összetevők, idegsejtek és agyi területek tanulmányozásakor (az agy visszafejtése közben) felfedezett algoritmusokat is.

Nem tartható az a megállapítás, hogy egy rendszer, amelyben a logikai algoritmus eredendően a fizikai felépítéshez kötődik, „nem lehet gép”. Ha a működési elve érthető, matematikailag modellezhető és egy másik rendszerben megvalósítható (akár egy változtathatatlan célorientált logikájú gépen, akár egy programozható számítógép szoftverjében), akkor azt a rendszert gépnek nevezhetjük, főként pedig olyan entitásnak, amelynek képességeit újrateheremthetjük egy gépben. Mint azt a negyedik fejezetben hosszasan tárgyaltam, nem állnak előttünk korlátok az agy működési elveinek felfedezése, de a molekuláris kölcsönhatásoktól az egészen magas szintű összefüggésekig történő modellezése és szimulálása terén sem.

Bell azt állítja, hogy a számítógépek „fizikai felépítése úgy van kialakítva, hogy ne akadályozza a logikai felépítését”, amivel azt sugallja, az agyra nem jellemző ez a „korlátozottság”. Igaza van abban, hogy gondolataink segítenek az agyunk létrehozásában, és mint azt már kifejtettem a könyvben,

ezt a jelenséget meg is figyelhetjük a dinamikus agyletapogatásban. Ám szoftverekkel könnyedén modellezhetjük és szimulálhatjuk az agy képlékenységeinek mind fizikai, mind logikai aspektusait. Az a tény, hogy a számítógépszoftverek elkülönülnek a fizikai hordozóiktól, architekturális előny, amelynek segítségével ugyanaz a szoftver alkalmazható a mindig megújuló hardverre. A számítógépszoftver – csakúgy, mint az agy változó körei – képes módosítani magát, és tetszés szerint frissíthető.

A számítógéphardver hasonlóképpen frissíthető a szoftver változtatása nélkül. Csupán az agy viszonylag merev felépítése az, ami erősen korlátozott. Bár az agy képes létrehozni új kapcsolatokat és ingerületátviteli mintákat, az elektronikánál több mint egymilliószer lassabb vegyi jelrendszerre, illetve a koponyánkban éppen hogy elférő, meghatározott számú interneurális kapcsolatra korlátozódik, továbbá nem frissíthető, hacsak nem a könyvben tárgyalt nem biológiai intelligenciával való összefonódás útján.

Szintek és ciklusok. Bell az agy látszólagos komplexitásáról is ír:

„Molekuláris és biofizikai folyamatok irányítják az idegsejtek érzékenységét (mind a szinaptikus hatékonyságot, mind a posztzinaptikus válaszadó képességet) a bejövő jelekre, az idegsejt tüzelésre való gerjeszthetőségét, az idegsejt által létrehozott jelsorozatok mintázatát és az új szinapszisok létrejöttének valószínűségét (a dinamikus újrakódolást), hogy csak négyet említsek a szubneurális szint legnyilvánvalóbb kölcsönhatásai közül. Továbbá ma már tudjuk, hogy a transzneurális mennyiségi jellemzők, mint például a helyi elektromos mezők és a nitrogén-monoxid transzmembrán diffúziója, hatással vannak a koherens idegi tüzelésre és a sejtekbe (a véráram útján) történő energiatovábbításra, mely utóbbi közvetlenül összefügg az idegi tevékenységgel. A lista a végtelenségig sorolható. Úgy hiszem, hogy egy őszinte ember, aki komolyan tanulmányozza a neuromodulátorokat, ioncsatornákat vagy szinaptikus mechanizmusokat, nem tehet mást, mint hogy elveti az idegsejti szint mint különálló komputációs szint gondolatát, még ha deskriptív értelemben hasznos elképzelés is.”^[738]

Bár Bell szerint a neurális szint nem az agy szimulálásának megfelelő szintje, elsődleges érve Thomas Ray fentebb tárgyalt kritikájához hasonlít: az agy bonyolultabb, mint az egyszerű logikai kapuk. Részletesen ki is fejti gondolatait:

„Nevetséges az az állítás, hogy egy adag strukturált víz vagy egy bizonyos kvantumkoherencia az agy funkcionális leírásának nélkülözhetetlen részletét jelenti. Ám ha az adott sejtek molekulái ezektől a szubmolekuláris folyamatoktól nyerik rendszerfunkciójukat, ha ezek a folyamatok az agy egész területén mindig használatban vannak, és visszatükrözik, rögzítik, valamint továbbítják a molekuláris fluktuációk térbeli és időbeli összefüggéseit, a kölcsönhatások valószínűségét és specifikumát erősítve vagy gyengítve, akkor a logikai kaputól minőségileg is eltérő helyzetet kapunk.”

Bell egy bizonyos szinten vitatja az idegsejtek és interneurális kapcsolatok sok neurálisháló-projektben használt, leegyszerűsített képét. Az agyterületi szimulációk azonban nem ilyen leegyszerűsített modelleket, hanem az agy visszafejtéséből nyert realisztikus matematikai sémákat

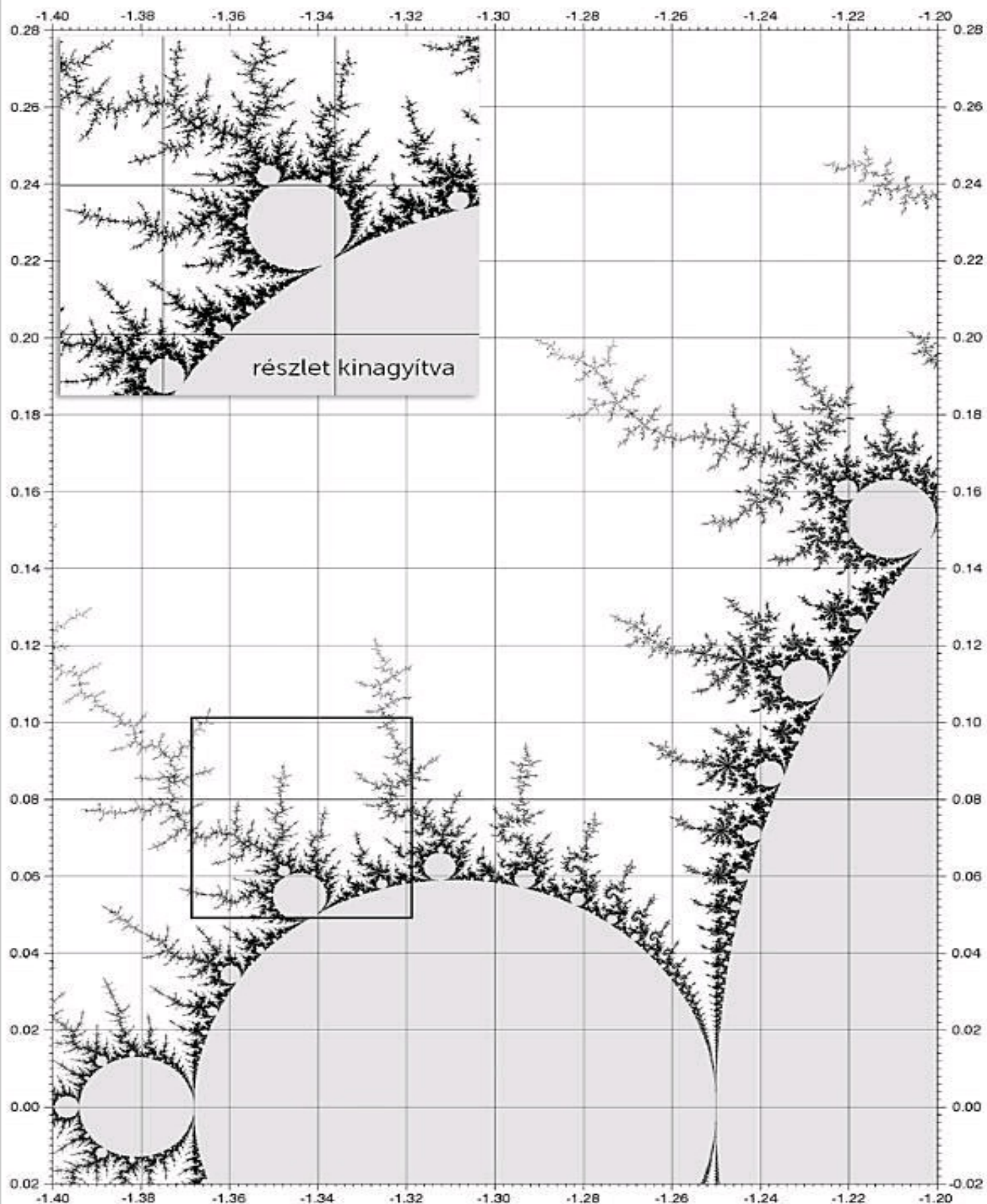
használnak.

Bell igazából azt állítja, hogy az agy rendkívül bonyolult, és ez következésképpen azt jelenti, hogy nagyon nehéz megérteni, modellezni és szimulálni a működését. Nézőpontja csak ott hibádzik, hogy elfelejt számolni az agy felépítésének önszerveződő, kaotikus és fraktáaltermészetével. Nem kétséges, hogy az agy komplex szerv, de a komplexitás nagy része inkább látszólagos, mint valós jelenség. Más szóval az agy felépítésének alapelvei egyszerűbbek, mint amilyenek tűnnek.

Hogy ezt megértsük, vegyük először az agy szerveződésének fraktáaltermészetét, amit a második fejezetben tárgyaltam! A fraktál különleges alakzat, amelyet egy szabály ismétlődő alkalmazásával kapunk. A szabály gyakran rendkívül egyszerű, de az ismétlés révén a fraktál mintája meglehetősen összetett lesz. Ennek egyik híres példája a matematikus Benoit Mandelbrot által tervezett Mandelbrot-halmaz.^{[17391](#)} A Mandelbrot-halmaz vizuális megjelenítései feltűnően komplex képek, végtelenül bonyolult mintákba ágyazódó további bonyolult mintákkal. Amint a Mandelbrot-halmaz egyre apróbb részleteire irányítjuk a figyelmünket, a komplexitás nem tűnik el, és mindegyre finomabb összetettséget találunk. Ehhez képest az egész komplexitás mögött rejlő képlet meglepően egyszerű: a Mandelbrot-halmazt a $Z = Z^2 + C$ képlet írja le, ahol Z egy „komplex” (azaz kétdimenziós) szám, és C egy állandó. A képletet ismételve alkalmazzák, és az eredményként kapott kétdimenziós pontok egy mintát jelenítenek meg a grafikonon.

Arról van szó, hogy egy egyszerű szabály látszólagosan magasfokú komplexitást eredményezhet. Stephen Wolfram hasonlóképpen érvel, amikor egyszerű szabályokat alkalmaz sejtautomatákon (lásd a második fejezetet). Ez a felfedezés igaz az agy felépítésére is. Mint már bemutattam, a tömörített genom relatíve összetett minta, kisebb, mint sok mai program. Bell felhívja a figyelmet arra, hogy az agy valós kivitelezése sokkalta komplexebbnek látszik, mint a genomban foglalt komplexitás. Ugyanúgy, mint a Mandelbrot-halmaz esetében, amikor az agy mind finomabb és finomabb struktúráit elemezzük, minden szinten látszólagos komplexitást találunk. Makroszinten a kapcsolatok mintája bonyolultnak tűnik; mikroszinten nemkülönben, például az idegsejt egy része, mondjuk a dendrit. Már említettem, hogy legalább több billiárd byte-ra lenne szükségünk az emberi agy pillanatnyi állapotának jellemzéséhez, ám mindössze több tízmillió byte-ra ahhoz, hogy a felépítését leírjuk. Így az agy látszólagos komplexitásának aránya a tervinformációhoz legalább százmillió az egyhez. Az agy összinformáció-tartalma meglehetősen véletlenszerű információhalmazként indul, de amint maga a szerv kölcsönhatásba lép egy komplex környezettel (azaz amint tulajdonosa tanul és érik), az információ jelentést nyer.

Mandelbrot-halmaz



A tényleges felépítés komplexitását a tervben található tömörített információ uralja (azaz a genom és a támogató molekulái), nem pedig a tervszabályok ismétlődő alkalmazásán keresztül létrehozott minták. Egyetértek azzal az állítással, miszerint a genomban hordozott információ durván harminc-százmillió byte-ja nem egyszerű felépítések leírására jött létre (bizonyosan sokkal komplexebb minták kódolására alakult ki, mint a Mandelbrot-halmaz hatkarakteres definíciója), mégis olyan szintű komplexitást reprezentál, amelyet technológiánk már képes kezelni. Több gondolkodó nem tud napirendre térni az agy fizikai megjelenésének látszólagos komplexitása felett, és nem ismerik fel, hogy a felépítés fraktáltermészete azt jelenti, a valós tervinformáció sokkal egyszerűbb, mint amit az agyban találunk.

A második fejezetben arról is esett már szó, hogy a genomban található tervinformáció probabilisztikus fraktál, azaz a szabályok minden egyes ismétlődésnél bizonyos fokú véletlenszerűséggel kerülnek alkalmazásra. Például nagyon kevés információ érhető el a genomban a cerebellum huzalozására vonatkozóan, mely utóbbi szerv az agy idegsejtjeinek több mint felét tartalmazza. Kevés gén írja le a cerebellum négy sejtípusának alapvető mintáját, aztán lényegében így rendelkezik: „ismétlődjön ez a minta több milliárdszor úgy, hogy minden ismétléskor véletlenszerűen megváltozik!” Az eredmény nagyon bonyolultnak tűnik, de a tervinformáció viszonylag rövid.

Bell helyesen állítja, hogy hiába próbálnánk az agy felépítését egy hagyományos számítógépéhez hasonlítani. Az agy nem követi a tipikus hierarchikus (moduláris) felépítést. Probabilisztikus fraktálszervezettséget mutat kaotikus – azaz részben kiszámíthatatlan – folyamatai létrehozásában. Van a matematikának egy bejáratott ága, amely a kaotikus rendszerek modellezésével és szimulálásával foglalkozik, miáltal megérthetőek az időjárási minták, pénzpiacok és egyéb jelenségek. Ez a matematika az agyra is alkalmazható.

Bell nem említi ezt a megközelítést. Azt magyarázza, miért különbözik az agy drasztikusan a hagyományos logikai kapuktól és a konvencionális szoftverek felépítésétől, és ebből indokolatlanul arra következtet, hogy az agy nem gép és nem is lehet gépben modellezni. Míg abban igaza van, hogy a szokványos logikai kapuk és a hagyományos moduláris szoftverek szervezeti képe nem adja az agy megfelelő analógiáját, ez még nem jelenti azt, hogy nem vagyunk képesek az agyat számítógépen szimulálni. Mivel az agy működési elveit matematikai nyelven is leírhatjuk, és mivel a matematikai folyamatokat (még a kaotikusakat is) számítógépen modellezhetjük, képesek vagyunk véghezvinni ezeket a szimulációkat. Valójában ez a kutatási terület biztos és gyorsuló fejlődést mutat.

Szkepticizmusa ellenére Bell óvatos bizakodással állítja, hogy elég jól fogjuk érteni a biológiai felépítésünket és az agyunkat ahhoz, hogy javíthassunk rajtuk. Azt írja: „Eljön a transzhumán kor? A biológiai evolúció két lényeges lépésében találjuk meg a precedenst erre vonatkozóan. Először, amikor a prokarióta szimbióták eukarióta baktériumokká váltak, másodszor pedig amikor megjelentek az eukarióta kolóniáik többsejtű életformái... Hiszem, hogy az úgynevezett [transzhumán kor] elérkezhet.”

A mikrotubulusok és a kvantumszámítás kritikája

„A kvantummechanika titokzatos; a tudat titokzatos.

Q.E.D.: A kvantummechanika és a tudat szükségszerűen összetartozik.”

(Christof Koch, Roger Penrose elméletét gúnyolva, miszerint az az idegsejtek mikrotubulusainak kvantumszintű számítási tevékenysége az emberi tudat legfőbb forrása)⁽⁷⁴⁰⁾

Az elmúlt évtizedben az ismert fizikus és filozófus Roger Penrose az aneszteziológus Stuart Hameroffal együtt felvetette, hogy az idegsejtekben lévő finomszerkezetek, a mikrotubulusok egzotikus számításokat végeznek, amelyet „kvantumszámításnak” neveztek el. Amint arra már máshol kitértem, a kvantumszámítás qubiteket használó számítás, ami a megoldások minden lehetséges kombinációját egyszerre figyelembe veszi. A módszer a párhuzamos feldolgozás extrém formájának tekinthető (mivel a qubitek értékeinek minden kombinációját egyszerre ellenőrzi).

Penrose szerint a mikrotubulusok és kvantumszámítási képességeik bonyolítják az idegsejtek újratermelődésének és az agyban tárolt fájlok visszahozásának az elképzelését.^[741] Azt feltételezi, hogy az agy kvantumszámítási képessége felelős a tudatért, és hogy a biológiai vagy egyéb rendszerek nem lehetnek tudatosak kvantumszámítás nélkül. Bár egyes tudósok azt jelentették, hogy kvantumállapot-összeomlást (a bizonytalan kvantumtulajdonságok, mint a helyzet, perdület és sebesség kettősségének feloldódása) mutattak ki az agyban, még senki sem állította, hogy az emberi képességeknek valóban alapfeltétele a kvantumszámítás. Seth Lloyd fizikus azt nyilatkozta:

„Úgy hiszem, helytelen elképzelés az, hogy a mikrotubulusok számítási feladatokat végeznek az agyban, úgy, ahogyan azt [Penrose] és Hameroff felvetette. Az agy forró, nedves hely. Nem túl kedvező környezet a kvantumkoherencia kihasználására. A mikrotubulusok szuperpozíciója és polimerizációja/depolimerizációja, amit keresnek, nem tűnik kvantum-összefonódásnak... Az agy semmiképpen sem klasszikus digitális számítógép, de úgy vélem, a legtöbb feladatát a „klasszikus” módszerrel végzi. Ha lenne egy elég nagy számítógépünk, és minden idegsejtet, dendritet, szinapszist és egyebet modellezhetnénk vele, [akkor] valószínűleg sikerülne elvégezni rajta az agy által végrehajtott legtöbb feladatot. Nem hiszem, hogy az agy feladatmegoldás közben kvantumdinamikára támaszkodik.”^[742]

Anthony Bell szintén hangsúlyozza, „nincsen bizonyítékunk arra, hogy a szuperfolyadékokban és szupravezetőkben megismert nagyszabású makroszkopikus kvantumkoherenciák mennek végbe az agyban is”.^[743]

Ám még ha végez is az agy kvantumszámítást, ez nem változtat nagymértékben az emberi szintű (vagy azt meghaladó) számítástechnika kilátásain, és azt sem jelenti, hogy az agyfeltöltés megvalósíthatatlan. Először is, ha az agy valóban végez kvantumszámítást, az csak azt erősítené meg, hogy a kvantumszámítás lehetséges. Egy ilyen felfedezés semmiképp sem sugallná azt, hogy a kvantumszámítás kizárólag biológiai mechanizmusokra korlátozódik. A biológiai kvantumszámítási mechanizmusok, ha léteznek, sokszorosíthatók. A kisméretű kvantumszámítógépekkel végzett új kísérletek sikereseknek tűnnek. Még a hagyományos tranzisztor működése is az elektrondiódák kvantumhatásától függ.

Penrose véleményét úgy értelmezték, miszerint a kvantumállapotok egy adott halmazát lehetetlen tökéletesen lemásolni, így a tökéletes letöltés is lehetetlen. Nos, milyen tökéletesnek kell lennie egy letöltésnek? Ha addig fejlesztjük a letöltési technológiát, amíg a „másolatok” már olyan közel állnak az eredetihez, mint amennyire az eredeti személy hasonlít egy perccel azelőtti önmagához, az már elég jó lenne bármilyen elképzelhető cél szempontjából, és nem tenné szükségessé a kvantumállapotok lemásolását. A technológia fejlődésével a másolatok pontossága olyan közel állhatna az eredetihez, mint a személy hasonlósága önmagához egy rövidebb időtartam (egy szekundum, egy milliszekundum,

majd egy mikroszekundum) távlatából.

Amikor valaki felhívta Penrose figyelmét arra, hogy az idegsejtek (és még az idegi kapcsolatok is) túl nagyok a kvantumszámításhoz, előállt az elmélettel, miszerint a tubulusok lehetnek az idegi kvantumszámítás mechanizmusai. Ha valaki az agyműködés lemásolásának korlátait keresi, ez egy szellemes elmélet, de valójában nem mutat fel semmiféle valódi akadályt. Ám kevés jel mutat arra, hogy a mikrotubulusok, amelyek szerkezeti integritást adnak az idegsejteknek, kvantumszámítást végeznének, és hogy ez a képességük hozzájárulna a gondolkodásunk folyamatához. Még az emberi tudást és képességeket igen nagyvonalú, megengedő módon kezelő modelleket is kielégítően magyarázzák az agyméretre vonatkozó legújabb becslések, amelyek a mikrotubulusok esetleges kvantumszámítását figyelmen kívül hagyó mai idegsejtmodellekre alapoznak. A legújabb kísérletek, amelyek szerint a hibrid biológiai/nem biológiai hálózatok a tisztán biológiai hálózatokhoz hasonlóan teljesítenek, bár a kérdést nem döntik el egyértelműen, arra engednek következtetni, hogy a mikrotubulusok kvantumszámítását nem tételező idegsejtmodellek megfelelően adják vissza a valóságot.

Az emberi auditív feldolgozás kifinomult modelljének Lloyd Watts-féle szoftverszimulációja nagyságrendekkel kevesebb számítást tartalmaz, mint az általa szimulált idegsejtek hálózata, és semmi sem utal arra, hogy mindehhez szükség lenne kvantumszámításra is. A negyedik fejezetben áttekintettem más, napjainkban folyó, az agyi területek szimulálására irányuló kísérleteket, míg a harmadik fejezetben beszámoltam az agy minden területének szimulálásához szükséges becsült számításmennyiségről a különböző területek funkcionálisan ekvivalens szimulációi alapján. Ezen elemzések egyike sem mutatja, hogy a kvantumszámítás szükséges lenne az emberi szintű teljesítmény eléréséhez.

Az idegsejtek néhány részletes modellje (főként a Penrose és Hameroff-féle modell) szerepet tulajdonít a mikrotubulusoknak, mégpedig a dendritek és axonok működésében és növekedésében. Azonban az idegi területek sikeres neuromorf modelljei láthatólag nem igénylik a mikrotubuláris eredetű összetevőket. A mikrotubulusokat is számításba vevő idegsejtmodellek az egyes mikrotubulus-szálak külön modellezése nélkül is kielégítő pontossággal adják vissza azok általában kaotikus viselkedését. Ám még ha a Penrose–Hameroff-tubulusok fontos tényezők is, a számbavételük nem változtat jelentősen a fentebb tárgyalt jóslatokon. Az én számítástechnikai növekedési modellem szerint, ha a tubulusok ezerszeresen megnövelnék az idegsejt komplexitását (ne felejtjük el, hogy mai tubulusmentes idegsejtmodelljeink már így is komplexek, idegsejtenként úgy ezer kapcsolattal, összetett nemlinearitásokkal és egyéb részletekkel kiegészítve!), az csupán körülbelül kilenc évvel késleltetné az agy kapacitásának elérését. Ha egymilliószorosan vagyunk lemaradva, az még mindig csak tizenhét év késlekedést jelent. A milliárdszoros tényező körülbelül huszonnégy évet jelent (ugyanis a számítási kapacitás hatványozott exponenciális ütemben gyarapodik).^[74]

A Church–Turing-tézis kritikája

A XX. század elején Alfred North Whitehead és Bertrand Russell matematikusok kiadták meghatározó jelentőségű művüket, a *Principia Mathematicát*, amelyben a matematika egészének alapul szolgáló axiómák meghatározására törekedtek.^[75]

Azt azonban nem tudták egyértelműen bizonyítani, hogy a természetes számokat (a pozitív egészeket vagy számolásra használt számokat) létrehozó axiomatikus rendszer nem szül ellentmondásokat. Feltételezték, hogy előbb vagy utóbb megtalálják a bizonyítékot erre, de az 1930-as években egy

fiatal cseh^[17] matematikus, Kurt Gödel megdöbbenette a matematikai világot tételével, amely bizonyította, hogy egy ilyen rendszerben szükségszerűen léteznek olyan állítások, amelyeket sem bizonyítani, sem cáfolni nem lehet. Később kimutatták, hogy az ilyen bizonyíthatatlan állítások ugyanolyan gyakoriak, mint a hétköznapi bizonyítható állítások. Gödel nemteljességi tételét, ami alapvetően azt mutatja meg, hogy léteznek a logika, matematika, és ennél fogva a számítástechnika határait kijelölő korlátok, a matematika legfontosabb tételének nevezik, és következményei még mindig viták tárgyát képezik.^[746]

Alan Turing hasonló végkövetkeztetésre jutott a számítástechnika természetét illetően. Amikor 1936-ban Turing bemutatta a Turing-gépet (amiről a második fejezetben írtam) mint a számítógép elméleti modelljét – mely ma is a modern számítástechnika elméleti alapját képezi –, egy Gödeléhez hasonló váratlan felfedezésről számolt be.^[747] Értekezésében leírta a megoldhatatlan problémák fogalmát – azaz az olyan problémákét, amelyeket jól le lehet írni, és megmutatható, hogy létezik rájuk egyértelmű válasz, de bizonyítható, hogy Turing-géppel nem lehet kiszámolni őket.

Az a tény, hogy léteznek eme elméleti gép által megoldhatatlan problémák, addig nem tűnik különösnek, amíg végig nem gondoljuk Turing dolgozatának másik következtetését: hogy a Turing-gép bármilyen számítástechnikai folyamatot képes modellezni. Turing bebizonyította ugyanis, hogy annyi megoldhatatlan probléma létezik, ahány megoldható, és a megoldhatók, illetve megoldhatatlanok száma a végtelen legalacsonyabb nagyságrendjében, az úgynevezett megszámlálható végtelenben mozog (ez az egész számok számosságával azonos).

Turing azt is bemutatta, hogy a megoldhatatlan problémákra jó példa egy tetszőleges, a természetes számokat megjeleníteni képes logikai rendszerben felvetett bármilyen logikai állítás igazságának vagy hamisságának a megállapítása, amivel Gödelhez hasonló következtetésre jutott. (Más szóval nincsen olyan eljárás, amivel minden állítás esetén szavatolható a válasz a kérdésre.)

Ugyanebben az időben Alonzo Church, egy amerikai matematikus és filozófus megjelentetett egy tételt, amely hasonló kérdéseket feszegetett a számelmélet területén. Church kortársaitól függetlenül Turingével megegyező eredményt kapott.^[748] Turing, Church és Gödel munkái először bizonyították formálisan, hogy a logika, matematika és számítás képességei korlátozottak.

Ezen kívül Church és Turing egymástól függetlenül egy olyan állításra bukkant, ami később a Church–Turing-tézis néven került be a logika történetébe. Ennek a tézisnek gyenge és erős értelmezése is létezik. A gyenge értelmezés az, hogy ha egy Turing-gépnek bemutatható probléma sem oldható meg egy adott Turing-gép által, akkor semmiféle gép által nem megoldható. Ez a következtetés Turing azon bizonyításából ered, miszerint a Turing-gép bármilyen algoritmusos folyamatot képes modellezni. Innen már csak kis ugrás az algoritmust követő gép viselkedésének leírása.

A tézis erős értelmezése az, hogy a Turing-gép által megoldhatatlan problémákat az emberi gondolkodás sem tudja megoldani. Eme értelmezés alapja az, hogy az emberi gondolkodást az emberi agy végzi (a test általi befolyásoltság alatt), hogy az emberi agy (és test) anyagból és energiából áll, hogy az anyag és az energia a természet törvényeinek engedelmeskedik, hogy ezek a törvények leírhatók a matematika nyelvén, és hogy a matematika bármilyen pontosságig szimulálható algoritmusok segítségével. Tehát léteznek algoritmusok, amelyek lemásolhatják az emberi gondolkodást. A Church–Turing-tézis azt állítja, lényegi egyenlőség van a között, ami egy emberi lény által kigondolható és tudható, és a között, ami kiszámítható.

Fontos megjegyezni, hogy bár Turing megoldhatatlan problémáinak létezése matematikai bizonyosságot nyert, a Church–Turing-tézis egyáltalán nem matematikai állítás. Inkább feltételezés,

ami az elmefilozófia legmélyebb vitáiban is felbukkan különböző álruhákban. ^[749]

Az erős mesterséges intelligencia Church–Turing-tézisen alapuló kritikája azt állítja, hogy mivel a számítógépek által megoldható problémák köre egyértelműen korlátozott, ám az emberek mégis képesek megoldani ezeket, a számítógépek soha nem fogják emulálni az emberi intelligencia teljes tartományát. Ez a következtetés azonban nem védhető. Az emberek általánosságban nem képesek a gépeknél jobban megoldani ezeket a „megoldhatatlan” problémákat. Értelmes találgatásba bocsátkozhatunk bizonyos helyzetek megoldásaira vonatkozóan és heurisztikus módszereket (olyan eljárásokat, amelyek megkísérlik megtalálni bizonyos problémák megoldását, de nem működnek garantáltan) is használhatunk, amelyek alkalmanként sikerre vezethetnek. De mindkét megközelítés egyben algoritmusalapú eljárás is, amiből azt következik, hogy a gépek is képesek alkalmazni őket. Valójában a gépek gyakran sokkal nagyobb sebességgel és alapossággal képesek megtalálni a megoldásokat, mint az emberek.

A Church–Turing-tézis erős értelmezése arra enged következtetni, hogy a biológiai agyak és gépek ugyanúgy a fizikai törvények szerint működnek, és ezért a matematika mindkettőt egyaránt képes modellezni és szimulálni. Már bemutattuk, hogy képesek vagyunk modellezni és lemásolni az idegsejt működését – akkor vajon ugyanez áll egy százmilliárd idegsejtből álló rendszerre is? Egy ilyen rendszer ugyanúgy a komplexitásról és a kiszámíthatóság hiányáról tanúskodik, mint az emberi intelligencia. Valójában már alkottunk olyan számítógépes algoritmusokat (például genetikai algoritmusokat), amelyek eredménye komplex és kiszámíthatatlan, és amelyek intelligens megoldásokat adnak a felvetett problémákra. A Church–Turing-tézis legalábbis azt feltételezi, hogy az agyak és gépek alapjában véve egyenlő képességekkel bírnak.

Ahhoz, hogy megértsük, a gépek képesek heurisztikus módszereket alkalmazni, vegyük az egyik legérdekesebb megoldhatatlan problémát, a „szorgos hód” problémáját, amelyet Radó Tibor vetett fel 1962-ben! ^[750] Minden Turing-gép belső programja meghatározott számú állapotba képes kerülni, amely állapotok száma megfelel a belső programjában lévő lépések számával. Meghatározott számú négyállapotú Turing-gép lehetséges, meghatározott számú ötállapotú gép, és így tovább. A „szorgos hód” problémájában egy adott pozitív egész szám n esetén, minden n állapotú Turing-gépet megépítünk. Az ilyen gépek száma mindig véges. Ezután kivesszük a számításból azokat az n állapotú gépeket, amelyek végtelen ciklusba kerülnek (azaz soha nem állnak meg). Végül azok közül, amelyek nem kerültek végtelen ciklusba, kiválasztjuk azt a gépet, amely a legnagyobb egyesekből álló számot írja ki a szalagjára. Nevezzük ezen Turing-gép által írt egyesek számát az n szám szorgos hódjának! Radó bebizonyította, hogy nincsen olyan algoritmus – azaz nincsen olyan Turing-gép –, amely minden n -re kiszámíthatná ezt a függvényt. A probléma lényege az, hogy ki kell válogatni minden olyan n állapotú gépet, amely végtelen ciklusba kerül. Ha arra programozunk egy Turing-gépet, hogy generáljon és szimuláljon minden lehetséges n állapotú Turing-gépet, ez a szimulátor maga is végtelen ciklusba kerül, amikor megpróbálja szimulálni az egyik végtelen ciklusba kerülő n állapotú gépet.

Annak ellenére, hogy ez egy megoldhatatlan probléma (ráadásul az egyik leghíresebb), néhány n -re meg tudjuk határozni a szorgoshód-függvényt. (Érdekes módon az is megoldhatatlan probléma, miként tudjuk különválasztani azokat az n -eket, amelyekre meg tudjuk határozni az n szorgos hódját, azoktól, amelyekre nem.) Például a 6 szorgos hódja könnyedén meghatározható: 35. Hét állapottal a Turing-gép képes szorozni is, így a 7 szorgos hódja sokkal nagyobb: 22 961. Nyolc állapot esetén a Turing-gép exponenciális függvényeket is képes számolni, így a 8 szorgos hódja még magasabb: megközelítőleg 10^{43} . Láthatjuk, hogy ez egy „intelligens” függvény, amennyiben nagyobb intelligenciára van szükség a nagyobb n -ek megoldásához.

Mire 10-hez érünk, a Turing-gép olyan kalkulációkat is el tud végezni, amelyeket az emberek – számítógép segítségével nélkül – már nem. Így a 10 szorgos hódját csak számítógép segédletével tudtuk meghatározni. A válasz leírása egészen egzotikus számrendszert igényel, amelyben az egymásra tornyosuló kitevők magasságát egy másik szám határozza meg, melyben a kitevők szintén egymásra tornyosulnak, melyek magasságát ismét csak egymásra tornyosuló kitevők határozzák meg, és így tovább. Mivel a számítógép az emberi aggyal szemben képes nyomon követni az efféle bonyolult számokat, úgy tűnik, a számítógépek sokkal inkább képesek lesznek megoldani a megoldhatatlan problémákat, mint az emberek.

A hibaszázalék kritikája

Jaron Lanier, Thomas Ray és egyéb gondolkodók mind magas hibaszázalékokat emlegetnek a technológia területén, amelyek gátat vetnek a technológia folytatólagos exponenciális gyarapodásának. Például Ray azt írja:

„Alkotásaink legkomplexxebbike nyugtalanító hibaszázalékkal dolgozik. A Föld körül keringő műholdak és teleszkópok, az űrsiklók, a bolygóközi szondák, a Pentium chip és a számítógépes operációs rendszerek mind a hagyományos módszerekkel hatékonyan megtervezhető és megépíthető találmányok határait tágítják... Legbonyolultabb szoftvereink (az operációs rendszerek és a telekommunikációs vezérlőrendszerek) már most több tízmillió sornyi kódot tartalmaznak. Jelenleg valószínűtlennek tűnik, hogy képesek legyünk több száz milliónyi vagy milliárdnyi kódsorból álló szoftvereket előállítani és működtetni.”^[751]

Először is fel kell tennünk a kérdést, milyen nyugtalanító hibaszázalékokra utal Ray. Mint már korábban említettem, a kifinomult felépítésű automatikus komputerizált rendszerek nap mint nap sikerrel reptetik és hozzák le a repülőgépeinket és figyelik kórházi intenzív osztályainkat, és szinte sohasem romlanak el. Ha nyugtalanító hibaszázalékok miatt kell aggódnunk, azok leginkább az emberi tévedésnek tulajdoníthatók. Ray az Intel mikroprocesszor chipekkel kapcsolatos és egyéb hibákra utal, ám ezek kifejezetten elenyészőek voltak, szinte semmiféle káros utóhatásokkal nem jártak, és gyorsan kijavításra kerültek.

Mint láttuk, a számítógépes rendszerek komplexitása valóban növekszik. Továbbá az emberi intelligencia emulálására tett erőfeszítéseink úttörő kísérletei az emberi agyban talált önszerveződő paradigmákat fogják felhasználni. Ahogyan egyre előbbre jutunk az emberi agy visszafejtéses megismerésében, új önszerveződő módszereket fogunk bevenni mintafelismerő és a mesterséges intelligencia kifejlesztésére használt szerszámkészletünkbe. Amint azt már hangsúlyoztam, az önszervező módszerek segítségével nem kell újabb kezelhetetlen szintű komplexitásra törekednünk. Nem lesz szükségünk „több milliárd kódsoros” rendszerekre az emberi intelligencia lemásolásához.

Szintén fontos kiemelni, hogy a tökéletlenség minden komplex folyamat velejárója, és ebbe az emberi intelligencia is beletartozik.

A „kötöttség” kritikája

Jaron Lanier és egyéb kritikusok már idézték a „kötöttség” helyzetét, amelyben a régi

technológiáktól a fenntartó infrastruktúrájukba történő nagymértékű beruházások okán nem lehet megszabadulni, és ezért megragadunk egy szinten. Ezek a gondolkodók úgy érvelnek, hogy az átható és komplex fenntartó rendszerek már meggátolták az innovációt például a közlekedésben, ami korántsem fejlődött olyan gyorsan, mint a számítástechnika.⁴⁷⁵²¹

A kötöttség nem az elsődleges akadály a közlekedés fejlődése szempontjából. Amennyiben egy komplex fenntartó rendszer létezése szükségszerűen lezárja a fejlesztés csatornáit, akkor miért nem látjuk ugyanezt a jelenséget az internet fejlődésének minden területén? Végül is az internet is szerteágazó és bonyolult infrastruktúrára támaszkodik. Ám mivel különösen az információfeldolgozás és információtovábbítás területei növekednek exponenciálisan, a közlekedéshez hasonló területek platójának (azaz egy S-görbe tetején való lecövekelésének) az az oka, hogy a terület nagyon sok – ha nem minden – rendeltetését már kielégítették az exponenciálisan növekvő kommunikációs technológiák. Saját vállalatom például az ország különböző területein alkalmaz kollégákat, és kommunikációs igényünk – amit annak idején csak egy személy vagy egy csomag szállítása révén lehetett volna megoldani – általában kielégíthető az egyre jobban megvalósítható virtuális találkozókkal (illetve a dokumentumok elektronikus terjesztésével és egyéb intellektuális termékekkel), amelyeket a kommunikációs technológiák teljes arzenálja tesz lehetővé. Lanier maga is ezeknek a fejlesztésén dolgozik. Ami még ennél is fontosabb, a közlekedés fejlődését az ötödik fejezetben tárgyalt nanotechnológia-alapú energiatechnológiák fogják elhozni. Ám a virtuális valóság egyre realisztikusabb, magas felbontású és teljes bemerülést biztosító formáinak megjelenésével szociális igényeinket egyre jobban a számítástechnikán és kommunikációs technológián keresztül fogjuk kielégíteni.

Mint azt az ötödik fejezetben említettem, az MNT-alapú termelés beköszönte elhozza a gyorsuló megtérülések törvényét az energia és a közlekedés területére is. Ha már majd gyakorlatilag bármilyen fizikai terméket képesek leszünk előállítani információból és rendkívül olcsó nyersanyagokból, a fenti, hagyományosan lassan fejlődő iparágakban is megfigyelhetjük az ár–teljesítmény-arány és kapacitás éves megkettőződését, ahogy azt az információs technológiákban is látjuk. Az energia- és közlekedési ipar effektíve információs technológiává változik majd át.

Figyelemmel követhetjük a nanotechnológia-alapú napelemek megjelenését, amelyek hatékonyak, pehelykönnyűek és olcsók, és ez párosul majd az energiamennyiség tárolására és elosztására alkalmas, hihetetlenül nagy kapacitású fűtőanyagcellákkal és egyéb technológiákkal. Az olcsó energia ugyanakkor átformálja a közlekedést. A nanomegoldásokkal tervezett napelemekből és egyéb megújuló technológiákból nyert, illetve a nano-fűtőanyagcellákban tárolt energia tiszta és olcsó megoldást biztosít majd a közlekedés minden formájának energiaellátására. Továbbá képesek leszünk – a tervezés költségét leszámítva (amit csak egyszer kell megfizetni) – szinte nulla költségű termékeket gyártani, többek között különböző méretű repülő eszközöket. Ennélfogva megvalósíthatóak lesznek az olyan apró repülő járművek, amelyek órák alatt közvetlenül az adott személyhez szállítják a csomagokat anélkül, hogy közvetítőkre, például szállítócégekre volna szükség. A nagyobb, de hasonlóan olcsó járművek nanotechnológiájú mikroszárnyaik segítségével embereket juttatnak majd el egyik helyről a másikra.

Az információs technológiák már jelenleg is nagy hatást gyakorolnak minden iparágra. Egy pár évtizeden belül teljes mértékben élvezhetjük a GNR-forradalom nyújtotta előnyöket, minden emberi fejlesztés lényegében információs technológiából fog állni, és mint ilyen, közvetlen hasznot nyerhet a gyorsuló megtérülések törvényéből.

Az ontológiai kritika: rendelkezhet-e egy számítógép tudattal?

„Még nem értjük teljesen, miként működik az agy, és ezért folyamatosan a legújabb technológiát használjuk arra, hogy modellként szolgáljon az agy megértéséhez. Gyermekkoromban meg voltunk róla győződve, hogy az agy egy telefonközpont. („Mi más is lehetne?”) Jót derültem rajta, amikor megtudtam, hogy Sherrington, a nagy brit idegkutató azt gondolta, az agy távírórendszerhez hasonlóan működik. Freud gyakran hasonlította a hidraulikus és elektromágneses rendszerekhez. Leibniz szerint olyan volt, akár egy malom, és állítólag az ókori görögök katapultként látták. Jelenleg nyilvánvalóan a digitális számítógép metaforáját használjuk.”

*(John R. Searle: Minds, Brains and Science
[Elmék, agyak és tudomány])*

Lehet egy számítógép – egy nem biológiai intelligencia – tudatos? Természetesen először is meg kellene határoznunk, mit jelent maga a kérdés. Mint már korábban bemutattam, ez az első látásra egyértelmű probléma egymásnak ellentmondó véleményeket szül. Függetlenül attól, miként akarjuk meghatározni a fogalmat, először is el kell fogadnunk, hogy a tudatot általában az emberi lét alapvető, ha nem egyenesen elengedhetetlen tulajdonságának tartják.^{[17531](#)}

A Berkeley Egyetem kiváló filozófusa, John Searle az emberi tudat mélységes misztériumának rendíthetetlen védelmezőjeként vált népszerűvé a követői körében, főként az erős mesterséges intelligencia olyan „redukcionistaí” ellenében, mint jómagam. És bár ünnepezt kínaiszoba-érvelésében Searle logikáját mindig is tautologikusnak tartottam, arra számítottam, felemelően értekezik majd a tudat kérdését érintő paradoxonokról. Éppen ezért meglepetéssel fogadtam a következő kijelentéseit:

„Az emberi agy a benne található meghatározott neurobiológiai folyamatok révén állítja elő a tudatot”;

„a legalapvetőbb felismerés az, hogy a tudat ugyanolyan biológiai folyamat, mint az emésztés, a tejelválasztás, a fotoszintézis vagy a mitózis”;

„az agy egy gép, biológiai gép, de attól még gép. Így hát az első lépés az agy működésének kifürkészése, majd egy mesterséges gép megépítése, amely ugyanolyan hatékony mechanizmussal rendelkezik a tudat előállítására”; és

„tudjuk, hogy az agy meghatározott biológiai mechanizmusokkal állítja elő a tudatot”.^{[17541](#)}

Akkor tehát ki is a redukcionista? Searle láthatóan azt hiszi, egy másik egyén szubjektivitását ugyanolyan könnyedén megmérhetjük, mint ahogyan megmérjük a fotoszintézisből származó oxigéntermelést. Searle azt írja, Kurzweil „gyakran említi az IBM Deep Blue-ját a számítógép magasabb rendű intelligenciájának bizonyítékeként”. Persze ennek éppen az ellentéte igaz: nem azért említem a Deep Blue-t, hogy jól helybenhagyjam a sakk kérdését, hanem azért, hogy megvizsgáljam a számomra kedves ellentétet a sakk emberi és gépi megközelítése között. Mint már korábban hangsúlyoztam, a sakkprogramok mintafelismerő képessége nőttön-nő, így ezek a rendszerek is elkezdik ötvözni a hagyományos gépi intelligencia analóg képességeit az emberibb jellegű mintafelismeréssel. Az emberi paradigma (az önszerveződő kaotikus folyamatok) vitathatatlan előnyöket kínál: képesek vagyunk felismerni rendkívül kifinomult mintákat, és reagálhatunk rájuk. Ám

gépeket is építhetünk, amelyek ugyanezekkel a képességekkel rendelkeznek. Az én műszaki érdeklődési területem például ez.

Searle neve szinte összefonódott az általa kitalált kínaiszoba-analógiával, amit az elmúlt húsz év során megannyi változatban kifejtett. Az egyik legteljesebb leírás 1992-es könyvében, a *The Rediscovery of the Mind*ban (Az elme újrafelfedezésében) jelenik meg:

„Úgy hiszem, az erős mesterséges intelligencia ellen felhozott legismertebb érv a kínaiszoba-feltevésem volt (...), amely bebizonyította, hogy egy rendszer még akkor is végrehajthat egy programot, tökéletes másolatát adva valamely kognitív képességnek, például a kínai nyelv értésének, ha az a rendszer egyáltalán nem ért kínaiul. Egyszerűen képzeljük el, hogy egy kínaiul nem értő személyt bezárunk egy szobába, kínai írásjelekkel és egy számítógépprogrammal együtt, amely képes kínai kérdésekre válaszolni. A rendszer bemeneti oldala kérdésformába rendezett kínai írásjeleket tartalmaz; a kimenet a kérdésekre adott kínai írásjelekkel leírt válaszok formájában jelenik meg. Feltételezhetjük, hogy a program olyan jó, hogy a kérdésekre adott válaszok nem különböztethetők meg egy kínai anyanyelvi beszélő válaszaitól. Ugyanakkor sem a szobában ülő személy, sem a rendszer bármely része nem ismeri a kínai nyelvet; és mivel a programozott számítógépben semmi olyan nincsen, ami ebben a rendszerben ne lenne meg, a programozott számítógép, számítógépi minőségében, sem ért kínaiul. Mivel a program tisztán formális vagy szintaktikus, és mivel az elme mentális vagy szemantikai tartalmát ismerjük, ha az elmét pusztán számítógépprogramok segítségével kívánjuk megalkotni, annak alapvető fontosságú tulajdonságai kimaradnak.”^[75]

Searle leírásai azt demonstrálják, kudarcra vagyunk ítélve, ha értékelni kívánjuk az agyi folyamatokat vagy az azokat másolni képes nem biológiai folyamatokat. Érvelését egy feltevessel kezdi: a szobában lévő „személy” nem ért semmit, mivel végeredményben „csak egyszerű számítógép”, ezért a saját előfeltevései szerint működik. Nem meglepő, hogy Searle ebből arra következtet, hogy a számítógép (amelyet a személy működtet) nem ért semmit. Searle tautológiáját egy alapvető ellentmondással vegyíti: a számítógép nem ért kínaiul, de (Searle szerint) meggyőzően válaszol kínai kérdésekre, kínai nyelven. Ám ha egy entitás – biológiai vagy másféle teremtmény – valóban nem ért emberi nyelven, egy rátermett beszélgetőtárs hamar leleplezi ezt a hiányosságot. Továbbá ahhoz, hogy a program meggyőzően válaszoljon, egy emberi agy komplexitásával kellene rendelkeznie. A megfigyelők már régen meghaltak és a föld alá kerültek, mire a szobában ülő személy több millió év elteltével végrehajt egy több millió oldal hosszúságú programot.

Először is, a személy csupán a CPU szerepét tölti be, tehát a rendszer kis része. Míg a személy nem látja ezt, a megértés szétterül a program és a program követéséhez szükséges, általa papírra vetett több milliárd jegyzet egészén. *Én értek angolul, de idegsejtjeim egyike sem ért.* A tudásom ingerületátviteli erősségek, szinaptikus rések és interneurális kapcsolatok szerteágazó mintáiban jelenik meg. Searle nem tud számot adni arról, mi a jelentősége az információ elosztott mintáinak és emergens tulajdonságainak. Az intelligens gépek jövőjének Searle-től és egyéb, alapvetően materialista filozófusoktól untig hallott kritikája nagy részben abból ered, hogy ezek a gondolkodók nem értik meg a számítástechnikai folyamatok – az emberi agyhoz hasonlóan – kaotikus, kiszámíthatatlan, kusza, kísérleti és emergens természetét. Searle természetesen visszatér a „szimbolikus” számítástechnika kritikájával, miszerint a rendezett szekvenciális szimbolikus folyamatok nem képesek utánozni a valódi gondolkodást. Azt hiszem, ebben igaza van (attól függően

persze, hogy milyen szinten modellezzük az adott intelligens folyamatot), de a szimbólumok manipulálása (a Searle által értett formában) nem a gépek vagy számítógépek megépítésének egyetlen módszere.

Az úgynevezett számítógépek (a probléma egy része maga a „számítógép” szó, mivel a gépek többre képesek, mint hogy csupán „számítanak”) nem csak szimbolikus feldolgozásra képesek. A nem biológiai entitások is alkalmazzák az emergens önszervező paradigmát, azt a már jelen lévő tendenciát, amely a következő évtizedekben sokkal fontosabbá válik. A számítógépek nem csak nullákat és egyeseket használhatnak, és még csak nem is feltétlenül kell digitálisnak lenniük. Ám még ha csak digitálisan működik is egy számítógép, a digitális algoritmusok képesek bármilyen kívánt pontosságig (vagy pontatlanságig) analóg folyamatokat szimulálni. A gépek lehetnek párhuzamosak is. Továbbá a gépek is használhatnak az agyéhoz hasonló kaotikus és emergens technikákat.

A mintafelismerő rendszerekben alkalmazott elsődleges számítástechnikai megoldások nem a szimbólumkezelés elvén működnek, hanem az ötödik fejezetben leírt önszerveződő módszereket követik (neurális hálók, Markov-modellek, genetikai algoritmusok és az agy visszafejtésére alapozott sokkal komplexebb paradigmák). Egy olyan gép, amely tényleg képes arra, amit Searle a kínaiszoba-elméletben bemutatott, nem egyszerűen nyelvi szimbólumokat kezelne, hiszen az a megközelítés nem működik. Ez áll a kínai szoba filozófiai trükkje mögött is. A számítástechnika természete nem korlátozódik a logikai jelek manipulálására. Valami történik az emberi agyban, és semmi nem állja útját ezen biológiai folyamatok visszafejtésének, illetve a nem biológiai entitásokban való lemásolásának.

Searle hívei minden bizonnyal úgy hiszik, a kínaiszoba-elmélet bizonyítja, hogy a gépek (azaz a nem biológiai entitások) soha nem fognak megérteni semmit, ami jelentéssel bír, mint például a kínai nyelv. Először is meg kell értenünk valamit: ahhoz, hogy ez a rendszer – a személy és számítógép – Searle szerint „tökéletesen szimuláljon valamiféle emberi kognitív képességet, például a kínai nyelv ismeretét”, és meggyőzően válaszoljon kérdésekre kínaiul, alapvetően át kell mennie egy kínai Turing-teszten. Ne feledjük, hogy itt most nem egy meghatározott listából válogatott kérdésekre adott válaszokról beszélünk (mert az triviálisan egyszerű feladat), hanem egy tudós emberi kérdező által feltett bármely váratlan kérdés vagy kérdéssor megválaszolásáról!

A kínai szobában ülő személy kicsi jelentőséggel bír, vagy semmilyennel sem. Mindössze adatokat táplál be a számítógépbe és mechanikusan továbbítja a kimenetet (vagy egyébiránt csak a program szabályait követi). És sem a számítógépnek, sem a személynek nem kell semmiféle szobában ülnie. Ha úgy értelmezzük Searle leírását, hogy a személy maga hajtja végre a programot, az semmin sem változtat, hacsak nem azon, hogy a rendszer rendkívüli módon lelassul a valós időhöz képest, és hogy a hibalehetőségek meglehetősen felszaporodnak. *Mind az ember, mind a szoba lényegtelen a kísérlet szempontjából.* Egyedül a számítógép (egy elektronikus komputer vagy a programot követő, embert is „tartalmazó” számítógép) fontos.

Ahhoz, hogy a számítógép valóban végrehajtsa ezt a „tökéletes szimulációt”, valóban kellene értenie kínaiul.

Az alapfeltételezés szerint a számítógépnek „megvan az a képessége, hogy érti a kínait”, így hát teljességgel ellentmondásos azt állítani, hogy „a beprogramozott számítógép... nem ért kínaiul”.

Egy általános számítógép és számítógépprogram, *ahogyan azokat ma ismerjük*, nem lenne képes sikeresen végrehajtani a leírt feladatot. Ha a számítógépet napjaink számítógépei mintájára értjük, akkor nem képes teljesíteni az alapfeltevést. Csak úgy tehetné, ha egy emberi tudat mélységével és komplexitásával rendelkezne. Turingnak a tesztjében felsejlő bámulatos felfedezése az volt, hogy egy

intelligens emberi kérdező által feltett, bármilyen lehetséges kérdéssor meggyőző, emberi nyelven való megválaszolásához valóban szükség van az emberi intelligencia teljességére. Egy olyan számítógép, amely képes végrehajtani ezt – és amely néhány évtized múlva már létezik –, emberi vagy annál is magasabb komplexitást igényel, és tényleg jól fog érteni kínaiul, mert máskülönben soha nem lehetne meggyőző az állítása, hogy valóban érti a kínai nyelvet.

Tehát ha mindössze azt állítjuk, hogy a számítógép „nem ismeri szó szerint a kínai nyelvet”, annak nem sok értelme van, hiszen ellentétes az állítás előfeltevésével. Azt állítani, hogy a számítógép nem tudatos, szintén nem túl elmés kijelentés. Searle más állításaival összhangban le kell vonnunk a következtetést, hogy nem tudjuk igazán, vajon a számítógép tudatos-e vagy sem. Nem jelenthetjük ki egyértelműen, hogy a viszonylag egyszerű gépek, beleértve napjaink számítógégeit is, nem tudatosak, de a belső működésüket is beleértve a viselkedésük legalábbis nem erre enged következtetni. Azonban mindez nem igaz egy olyan számítógépre, amely valóban képes arra, amire a kínai szobában szükség van. Egy ilyen gép legalábbis tudatosnak fog *tűnni*, még ha nem is mondhatjuk ki egyértelműen, hogy az-e vagy sem. Ám csak úgy kijelenteni, hogy a számítógép (vagy a számítógép, személy és szoba együttese) nyilvánvalóan nem tudatos, messze nem bölcs dolog.

A fenti idézetben Searle azt állítja, „a program tisztán formális vagy szintaktikus”. Ám amint azt már máshol kifejtettem, ez egy rossz előfeltevés, amely azon alapul, hogy Searle nem számol egy ilyen technológia követelményeivel. Searle legtöbb mesterségesintelligencia-kritikája mögött ez az előfeltevés bújik meg. Egy tisztán formális vagy szintaktikus program nem lesz képes megérteni a kínai nyelvet, és nem fogja „tökéletesen szimulálni valamelyik kognitív emberi képességet”.

De megint csak azt mondom: nem kell ilyenre építenünk a gépeinket. Építhetjük olyanra is, amilyenek a természet szerkesztette az emberi agyat: kaotikus, emergens, többnyire párhuzamosan működő eljárásokkal működő rendszernek. Továbbá semmi olyan alapvető elv nem foglaltatik benne a gép ideájában, amely utóbbi tudását csak a szintaxisra korlátozná és megakadályozná abban, hogy elsajátítsa a szemantikát. Amennyiben a Searle kínaiszoba-elképzelésében szereplő gép nem tanulta volna meg a szemantikát, nem lenne képes meggyőzően és válaszolni kínaiul a kérdésekre, és így ellentmondana Searle saját feltételezésének.

A negyedik fejezetben már tárgyaltam azt a folyamatos vállalkozást, amely az emberi agy visszafejtésére és a módszereinek a megfelelő kapacitású számítástechnikai platformokon való alkalmazására irányul. Tehát ha emberi agyként tanítjuk a számítógépet kínai nyelvre, tudni fog kínaiul. Ez talán túl egyértelműnek tűnik, de ez az az állítás, amivel Searle nem ért egyet. A saját kifejezésével élve nem szimulációról beszélek, hanem inkább az agynak nevezett masszív idegsejt-tömörülés teremtő erejéről, vagy legalábbis a gondolkodás élvonalában járó teremtő erőről.

Egy efféle másolat tudatos lesz? Nem hiszem, hogy a kínaiszoba-kísérlet bármi újat mond erről a kérdésről.

Azt is fontos megjegyezni, hogy Searle kínaiszoba-érvelése alkalmazható az emberi agyra.

Bár Searle nem ezt akarja bizonyítani, érvei azt sugallják, hogy szerinte az emberi agytól távol áll az értő gondolkodás. Idézem: „A számítógép... formális szimbólumok manipulálásával dolgozik. A szimbólumok maguk nem bírnak különösebb jelentéssel: csak olyan jelentésük van, amelyet hozzájuk csatolunk. A számítógép erről mit sem tud, hiszen mindössze a szimbólumokat variálja.”

Searle elismeri, hogy a biológiai idegsejtek gépek, így hát, ha a „számítógép” kifejezést egyszerűen helyettesítjük az „emberi aggyal” és a „formális szimbólumokat” az „ingerületátviteli koncentrációk és kapcsolódó mechanizmusok” összetétellel, a következőt kapjuk:

„Az [emberi agy] (...) [ingerületátviteli koncentrációk és kapcsolódó mechanizmusok] manipulálásával dolgozik. Az [ingerületátviteli koncentrációk és kapcsolódó mechanizmusok] maguk nem bírnak különösebb jelentéssel: csak olyan jelentésük van, amit hozzájuk csatolunk. Az [emberi agy] erről mit sem tud, hiszen mindössze az [ingerületátviteli koncentrációkat és kapcsolódó mechanizmusokat] variálja.”

Természetesen az ingerületátviteli koncentrációk és egyéb idegi részletek (például az interneurális kapcsolatok és ingerületátviteli minták) nem bírnak saját jelentéssel. Az emberi agyban felmerülő jelentés és megértés az agy komplex tevékenységi mintáinak *emergens* tulajdonsága. Ugyanez igaz a gépekre is.

Bár a „szimbólumok variálása” önmagában nem bír jelentéssel, az emergens mintáknak ugyanaz a potenciális szerepe a nem biológiai rendszerekben, mint az agyhoz hasonló biológiai rendszerekben. Hans Moravec azt írta: „Searle rossz helyen keresi a megértést... Úgy tűnik, nem tudja elfogadni, hogy az egyszerű mintákban valódi jelentés lakozhat.”^[756]

Vegyük most a kínai szoba egy második változatát! Ebben az elképzelésben a szobában nincsen sem számítógép, sem számítógépet kezelő ember, de van egy szoba tele emberekkel, akik kínai szimbólumokkal teleírt papírcsíkokat tologatnak – végeredményben egy komputert szimuláló embercsoportról van szó. Ez a rendszer meggyőzően válaszol a kínaiul feltett kérdésekre, de egyik résztvevő sem tud kínaiul, és a teljes rendszer sem ismeri ezt a nyelvet – legalábbis nem tudatosan. Searle lényegében kigúnyolja az ilyen rendszer „tudatosságának” gondolatát. „Mit tekintünk tudatosnak?” – kérdezi. „A papírfecniket? A szobát?”

A kínai szoba ezen változatával az a probléma, hogy még csak távolról sem oldja meg a kínaiul történő válaszadás problémáját. Ehelyett valójában egy gépesített folyamat leírása, amely egy táblázatgyűjtemény megfelelőjét használja a kérdések megválaszolásához – egy olyat, amelyet néhány egyértelmű logikai manipuláció egészít ki. Képes lenne megválaszolni egy korlátozott számú, előre megírt kérdést, de ha bármilyen tetszés szerinti kérdésre kellene választ adnia, ténylegesen értenie kellene a kínai nyelvet, ugyanúgy, ahogyan egy kínai anyanyelvű beszélő érti. Újra csak azt kérjük tőle, hogy menjen át a kínai Turing-teszten, és mint ilyen, olyan okosnak és körülbelül olyan összetettnek kell lennie, mint az emberi agy. Az egyszerű függvénytáblázatos algoritmusokkal ez egyszerűen megvalósíthatatlan.

Ha meg akarnánk alkotni egy agyat, amely érti a kínait, és amelyben az emberek a rendszer apró fogaskerekeiként működnének, valójában több milliárd emberre volna szükségünk, akik az emberi agyban folyó történéseket képeznék le (alapvetően az emberek szimulálnának egy számítógépet, amely ugyanakkor az emberi agy módszereit szimulálná). Ez csakugyan jó nagy szobát igényelne. És még ha rendkívül hatékonyan szerveződne is, a rendszer többezerszeresen lassabban futna, mint a kínait beszélő agy, amelyet próbálna lemásolni.

Mármost, az igaz, hogy a több milliárd ember egyikének sem kellene bármit is tudnia a kínai nyelvről, és egyiküknek sem kellene szükségszerűen tudni, mi történik ebben a kifinomult rendszerben. Ám ez ugyanúgy igaz a valódi emberi agy idegi kapcsolataira is: agyam több száz billió kapcsolata semmit sem tud erről a könyvről, amelyet írok, és egyikük sem tud angolul, sem pedig bármi mást, amit én tudok. Egyikük sincsen tudatában ennek a fejezetnek, ahogyan semmi egyébnek sem, aminek én tudatában vagyok. Valószínűleg egyikük sem tudatos. Ám a belőlük felépülő egész rendszer – más szóval Ray Kurzweil – tudatos. Legalábbis azt állítom, hogy tudatos vagyok (és ezt az állítást eddig senki sem vitatta).

Tehát ha megnöveljük Searle kínai szobáját, és egy szükségszerűen hatalmas „szobát” kapunk, ki a megmondhatója, hogy a teljes rendszert alkotó, kínait beszélő agyat szimuláló több milliárd ember együttese sem tudatos? Bizonyosan helyes lenne a megállapítás, hogy egy ilyen rendszer ismeri a kínai nyelvet. És még azt sem mondhatjuk, hogy nem tudatos, ahogyan nem mondhatjuk bármilyen más agyi folyamatról sem. Nem ismerhetjük egy másik entitás szubjektív tapasztalatát (és legalábbis úgy tűnik, hogy Searle néhány másik írásában elfogadja ezt a korlátot). Hiszen ez a masszív, több milliárd személyből álló „szoba” egy entitás. És talán tudatos. Searle *ipso facto* állítja, hogy nem tudatos, és hogy a következtetése nyilvánvaló. Talán annak tűnik, ha a szobát szobának hívjuk és csupán néhány papírlapot kezelő emberről beszélünk. De, mint mondtam, egy ilyen rendszer még csak kicsit sem működne.

A kínai szobában kódolt filozófiai fejetlenség egy másik megközelítése kimondottan a komplexitásról és a rendszer léptékéről szól. Searle szerint, amíg nem tudja bizonyítani, hogy az írógépe vagy magnója nem tudatos, nyilvánvalónak érzi, hogy nem azok. Miért olyan nyilvánvaló ez? Legalább egy oka ennek az, hogy az írógép és a magnó viszonylag egyszerű entitások.

Ám a tudat létezése vagy hiánya már korántsem annyira nyilvánvaló az emberi agyhoz hasonlóan komplex rendszerek esetén – vagy akár az emberi agy szerkezetének és „teremtő erejének” tökéletes másolata esetében. Ha egy ilyen „rendszer” emberi módon viselkedik és emberi módon beszél a kínait, akkor tudatosnak mondhatjuk? A válasz így már nem annyira nyilvánvaló. Searle valójában azt mondja kínaiszoba-kísérletével, hogy vegyünk egyszerű „gépet”, majd vegyük észre, milyen abszurd dolog egy ilyen egyszerű gépet tudatosnak nevezni. A buktató a vizsgált rendszer méretében és komplexitásában rejlik. A komplexitásból még nem feltétlenül következik a tudat, de a kínai szoba semmit nem mond arról, hogy egy ilyen rendszer tudatos-e.

Kurzweil kínai szobája. Nekem is megvan a magam elképzelése a kínai szobáról – nevezzük Ray Kurzweil kínai szobájának.

Gondolatkísérletem helyszíne egy szoba, amelyben egy ember tartózkodik. A szoba a Ming-dinasztiából származó tárgyakkal van díszítve, köztük egy állvánnyal, amelyen egy mechanikus írógép található. Az írógépet átalakították, és a billentyűin angol betűk helyett kínai írásjelek vannak. A mechanikai kapcsolatokat is furfangosan átkötötték, így amikor a szobában ülő személy beír egy kínai kérdést, az írógép nem a kérdést nyomtatja a papírra, hanem a kérdésre adott választ. Mármint, ez a személy kínai betűkkel kapja meg a kérdéseket, és lelkiismeretesen benyomja az írógép megfelelő billentyűit. Az írógép nem a kérdést nyomtatja ki, hanem a megfelelő választ. Az ember aztán kiadja a választ a szobán kívülre.

Nos, van nekünk egy szobánk egy emberrel, aki kívülről úgy tűnik, tud kínaiul, bár a valóság nyilvánvalóan egészen más.

És az írógép sem tud kínaiul. Csak egy egyszerű írógép, amelynek a mechanikai kapcsolószerkezetét átkötötték. Így annak ellenére, hogy a szobában ülő ember válaszolni tud a kínai kérdésekre, ki vagy mi az, akiről vagy amiről ténylegesen azt mondhatjuk, hogy tud kínaiul? A díszítések?

Neked is lehetnek fenntartásaid a kínai szobámmal szemben, nyájas olvasó.

Felhívhatod a figyelmemet arra, hogy a díszítésnek látszólag semmi jelentősége sincsen.

Ez igaz. Ahogyan az állványnak sem. Ugyanezt mondhatjuk el a személyről és a szobáról is.

Azt is hangsúlyozhatod, hogy az előfeltevés abszurd. Egy mechanikus írógép mechanikus összeköttetéseinek megváltoztatásával még nem képes meggyőző kínai válaszokat adni (arról már

ne is beszéljünk, hogy egy írógép billentyűin nem fér el több ezer kínai írásjel).

Igen, ez is megalapozott ellenvetés. Az egyetlen különbség az én kínai szobám és a Searle által javasolt több tucat kínai szoba között az, hogy az én elképzelésem nyilvánvalóan nem működhetne és természete szerint abszurd. Ez nem biztos, hogy olyan egyértelmű a Searle-féle kínai szobák minden olvasója számára.

Ettől függetlenül így van.

És ennek ellenére mégis működhet az elképzelésem, ahogyan Searle elképzelése is működhet. Mindössze annyit kell tennünk, hogy az írógép kapcsolószerkezetét az emberi agyhoz hasonlóan összetetté kell változtatni. És ez elméletileg (ha gyakorlatilag nem is) lehetséges. Ám az „írógép kapcsolószerkezete” kifejezés nem sugall ilyen mérvű komplexitást. Ugyanez igaz Searle leírására, amelyben egy ember papírszeleteket kezel egy könyvnek, vagy szabályoknak, vagy számítógépprogramnak engedelmeskedve. Ezek mind félrevezető elképzelések.

Searle azt írja: „Az emberi agy a benne található meghatározott neurobiológiai folyamatok révén állítja elő a tudatot.” Azonban nem adott bizonyítékot erre a meglepő állításra. Hogy jobban megértsük Searle nézőpontját, hadd idézzek egy nekem küldött leveléből:

„Kiderülhet, hogy az olyan meglehetősen egyszerű organizmusok, mint a termeszek vagy a csigák tudatos lények... A lényeg az, hogy felismerjük, a tudat ugyanolyan biológiai folyamat, mint az emésztés, a tejelválasztás, a fotoszintézis vagy a mitózis, és hogy meghatározott biológiai magyarázatot kell keresnünk rá ugyanúgy, mint az említett többi folyamat esetében.”^[757]

Azt válaszoltam erre:

„Igaz, hogy a tudat az agy és a test biológiai folyamatából vagy folyamataiból ered, de legalább egyvalamiben különbözik az említettektől. Ha azt kérdezem, »egy bizonyos entitás szén-dioxidot bocsát-e ki«, a kérdést egyértelműen meg tudom válaszolni objektív mérés útján. Ha azt kérdezem azonban, »tudatos-e ez az entitás?«, talán tudok rá következtetni – valószínűleg erős és meggyőző logikai következtetéssel –, de nem létezik rá objektív mérés.”

A csigával kapcsolatban a következőt válaszoltam:

„Amikor azt mondja, egy csiga lehet tudatos, azt hiszem, valójában a következőt mondja: elkülöníthetjük a tudat egy bizonyos neurofiziológiai bizonyítékát (nevezzük »x«-nek) az emberekben, amely ha jelen van bennük, akkor tudatosak, és amikor nincsen jelen, akkor nem azok. Így feltételezhetően lenne objektíven mérhető bizonyítékunk a tudatra. És amikor egy csigában bukkanunk rá erre, mondhatjuk, hogy a csiga tudatos lény. De ez a logikai következtetés csupán egy erős gyanú, nem pedig a szubjektív tapasztalat bizonyítéka a csigában. Az is lehet, hogy az emberek tudatosak, mert megvan bennük »x« plusz valami más tulajdonság, ami eredendően minden emberben megvan, nevezzük ezt »y«-nak. Lehet, hogy az »y« az ember komplexitásával, vagy a szervezetünkkel, vagy mikrotubulusaink kvantumtulajdonságaival (bár ez talán az »x« része), vagy valami egész mással kapcsolatos. A csigának lehet »x«-e, de nincsen »y«-ja, így hát nem biztos,

Hogyan lehet eldönteni ezt a vitát? A csigát természetesen nem kérdezhetjük meg. Még ha el is tudnánk képzelni, hogyan tegyük fel a kérdést, és igennel válaszolna, az sem bizonyítaná, hogy tudatos. Viszonylag egyszerű és többé-kevésbé kiszámítható viselkedéséből sem derülhetne ki. Az, hogy rendelkezik „x”-szel, jó érv lehet, és sok embert meg is győz. Ám akkor is csak egy érv – nem a csiga szubjektív tapasztalatának közvetlen megmérésén alapul. Nem árt megismételnünk: az objektív mérés nem egyeztethető össze a szubjektív tapasztalás fogalmával.

Manapság sok hasonló vitával találkozunk – bár nem annyira a csigákról folynak, inkább a magasabb rendű állatokról. Számomra úgy tűnik, hogy a kutyák és macskák tudatos lények (és Searle azt mondta, ezt ő is elismeri). Ám ezt nem minden ember fogadja el. El tudok képzelni egy ezt az álláspontot megerősítő tudományos megoldást, amely rámutat ezen állatok és az emberek közötti megannyi hasonlóságra, de ezek is csak érvek volnának, nem tudományos bizonyítékok.

Searle a tudat biológiai „okát” keresi, és mintha nem lenne képes elfogadni, hogy a megértés vagy a tudat egy tevékenység átfogó mintájából következik. Más filozófusok, például Daniel Dennett, megfogalmazták a tudat ilyen „mintaemergens” elméleteit. Ám akár meghatározott biológiai folyamatok „okozzák” a tudatot, akár egy tevékenységi minta, Searle nem magyarázza meg, miként tudjuk megmérni vagy kimutatni. A tudat neurológiai korrelációjának felfedezése az emberben nem bizonyítja, hogy a tudat szükségszerűen jelen van más, ugyanolyan korrelációval rendelkező lényekben, és azt sem bizonyítja, hogy ezen korreláció hiánya a tudat hiányát jelzi. Ezek a következtetések már nem ellenőrizhetők közvetlen méréssel. Bizonyos értelemben a tudat különbözik az olyan objektíven mérhető folyamatoktól, mint a tejelválasztás vagy a fotoszintézis.

Mint azt a negyedik fejezetben kifejtettem, már felfedeztünk egy olyan biológiai tulajdonságot, amely egyedülálló az emberben és egynéhány másik főemlősben: az orsósejteket. És úgy tűnik, hogy ezek a mélyen elágazó szerkezetű sejtek szoros kapcsolatban állnak tudatos, főképpen érzelmi reakcióinkkal. Az orsósejt szerkezete volna az az „x”, ami a tudat neurobiológiai alapja? Milyen vizsgálat tudná ezt bizonyítani? A macskáknak és kutyáknak nincsenek orsósejtjeik.

Ez tehát bizonyítja, hogy nincsen tudatos tapasztalásuk?

Searle azt írja: „Tisztán neurobiológiai szempontból egy szék vagy egy számítógép nyilvánvalóan nem tekinthető tudatosnak.” Egyetérték, hogy a székek nem tűnnek tudatosnak, de ha a jövő számítógépei ugyanolyan komplexitással, mélységgel, kifinomultsággal és képességekkel rendelkeznek majd, mint az emberek, nem hiszem, hogy esetükben kizárhatjuk ezt a lehetőséget. Searle mindössze feltételezi, hogy nem azok, és hogy ostobaság ennek ellenkezőjét feltételezni. Searle „érveiben” valójában csak annyi szilárd bizonyíték van, amennyit ez a tautológia hordoz.

Searle-nek a tudatos számítógépekkel szemben felvett álláspontja részben azért lehet vonzó, mert a ma ismert számítógépek nem tűnnek tudatosaknak. Viselkedésük törekeny és formulák által meghatározott, még ha alkalomadtán kiszámíthatatlanul viselkednek is. Ám amint már fentebb rámutattam, a mai számítógépek körülbelül egymilliószer egyszerűbbek, mint az emberi agy, amiből egyrészt az következik, hogy nincsen meg bennük az emberi gondolkodás minden megnyerő aspektusa. Ám ez a választóvonal gyorsan halványul, és a reláció néhány évtizeden belül megfordul. A könyvben bemutatott XXI. századi gépek nagyon másképpen fognak kinézni és viselkedni, mint napjaink viszonylag egyszerű számítógépei.

Searle azt a nézetet fogalmazza meg, miszerint a nem biológiai entitások csak logikai szimbólumokat képesek kezelni, és úgy tűnik, más paradigmát nem ismernek. Igaz, hogy a

szabályalapú szakértő rendszerek és a játékprogramok nagyjából a szimbólumkezelés elvén működnek, de a jelenlegi tendenciák másfelé mutatnak, mégpedig az olyan önszerveződő kaotikus rendszerek irányába, amelyek a biológiából vett módszerekkel, például közvetlenül az emberi agynak nevezett több száz idegsejtcsoport visszafejtéséből megismert módszerekkel működnek.

Searle elfogadja, hogy a biológiai idegsejtek gépek – sőt azt is, hogy az egész agy egy gép. Mint a negyedik fejezetben bemutattam, már lemásoltuk az egyes idegsejtek, valamint a tényleges idegsejtcsoportok rendkívül részletes „teremtő erejét”. Nincsen előttünk olyan elvi akadály, ami miatt ezeket a kísérleteket ne terjeszthetnénk ki az egész emberi agyra.

A gazdag–szegény választóvonal kritikája

Jaron Lanier és mások felemlengetnek egy további „vérfagyasztó” lehetőséget, miszerint az új technológiák olyan előnyökhöz és lehetőségekhez juttatják a tehetőseket, amilyenekhez az emberiség többi részének nem lesz hozzáférése.⁴⁷⁵⁸¹ A társadalmi különbségek persze mindig is léteztek, de a gyorsuló megtérülések törvénye fontos és jótékony változást hoz majd ezen a területen is. Az ár–teljesítmény-arány folytonos exponenciális javulásával ezek a technológiák hamar olcsóvá, majdhogynem ingyenessé válnak.

Nézzük csak meg, milyen nagy mennyiségű, jó minőségű információ áll rendelkezésre az interneten ma, ami néhány éve még nem is létezett! És ha valaki tiltakozna, hogy az emberiség csupán kis részének van ma internet-hozzáférése, ne felejtsük el, hogy a webböröngés még csupán gyerekcipőben jár, és a hozzáférés exponenciálisan növekszik! A világháló elérhetősége még Afrika legszegényebb országaiban is sebesen javul.

Az információs technológia minden vívmánya kezdetlegesebb szerkezetű, kevésbé jól működő változatokkal indul, amelyek az eliten kívül senki számára sem megfizethetőek. Később a technológia már egy kicsit jobban üzemel, és egyszerűen drágává válik. Aztán egészen jól működik, és az ára is drasztikusan csökken. Végül pedig kiválóan operál, és szinte ingyen van. Például a mobiltelefon jelenleg valahol a legutolsó két állomás között tart. Gondoljuk csak meg: ha egy évtizede egy filmbéli szereplő elővett egy hordozható telefont, az azt jelentette, hogy az adott személy nagyon gazdag, hatalmas, vagy mindkettő!

Léteznek olyan társadalmak a világon, amelyek lakosságának a többsége két évtizede még kétkezi agrármunkát végzett, mára pedig virágzó információalapú gazdaságokat hoztak létre és széles körben használják a mobiltelefont (például az ázsiai társadalmak, köztük Kína vidéki területei). A váltás a nagyon drága korai felhasználásról a nagyon olcsó, általános elérhetőségig manapság már csak egy évtized műve. Azonban az egyes évtizedek paradigmaváltási sebességének megkettőződéséből ítélve mostantól számítva egy évtized múlva ez az elmaradás öt évre redukálódik. Húsz éven belül a különbség csupán két vagy három év marad (lásd a második fejezetet).

A gazdagok és szegények között tátongó szakadék égető kérdés, és minden időpillanatban egyre többet kell és lehetne tenni ellene.

Tragikus például arra gondolnunk, hogy a fejlett országok nem nyújtottak segédkezet az AIDS-gyógyszerek terjesztéséhez többek között a szegény afrikai országokban és egyéb helyeken, ami több millió emberéletbe került. De az információs technológiák ár–teljesítmény-arányának exponenciális javulása gyorsan áthidalja a szakadékot. A gyógyszerek alapján véve az információs technológia részei, és ugyanazt az ár–teljesítmény-arány-kettőződést látjuk esetükben, mint egyéb információs technológiáknál, például a számítógépek, kommunikáció és a DNS-bázispár-szekvenálás esetében. Az

AIDS-gyógyszerek eleinte nem működtek túl jól, és évente több tízezer dollárba kerültek betegenként. Ma elfogadható a hatékonyságuk, és évente már csak száz dollár per beteg költségük van a szegényebb, például afrikai országokban.

A második fejezetben idéztem a 2004-es világbanki jelentést a fejlődő országokban mért, a világátlaghoz (4%) viszonyított magasabb gazdasági növekedésről, és a szegénység általános csökkenéséről (például a kelet-ázsiai és csendes-óceáni térség rendkívüli szegénységének 43%-os csökkenését mérték 1990 óta). Xavier Sala-i-Martin közgazdász például az egyes emberek közti globális egyenlőtlenség nyolc mérőszámát vizsgálta, és úgy találta, hogy az elmúlt negyed évszázadban a különbségek csökkentek. ^[759]

Az állami szabályozás valószínűségének kritikája

„Ezek az emberek itt úgy tesznek, mintha a kormány nem lenne az életük része. Talán azt kívánják, bárcsak valóban ne így lenne, de attól még ez a helyzet. Ahogyan egyre közelebb kerülünk a ma itt megtárgyalt kérdésekhez, jobb, ha tudja, hogy azokat a kérdéseket az egész ország megvitatja majd. Az amerikaiak nagy része nem fog a hátsóján ülni, miközben valami elitcsoport tagjai megszabadulnak a személyiségüktől és feltöltik magukat a kibertérben kialakított Paradicsomukba. Ahhoz nekik is lesz egy-két szavuk. Ádáz vita fog erről folyni ebben az országban.”

*(Leon Fuerth, korábbi nemzetbiztonsági tanácsadó,
Al Gore alelnöknek a 2002-es Foresight Konferencián)*

„Az emberi élet halál nélkül már nem volna annyira emberi; a halál tudatából születtek legmélyebb vágyakozásaink és legnagyobb eredményeink.”

(Leon Kass, az Elnöki Bioetikai Bizottság elnöke, 2003)

Az állami irányítás kritikája arra figyelmeztet, hogy a törvényi szabályozás lelassul és gátat szab a technológiai gyorsulásnak. Bár a szabályozás létfontosságú kérdés, valójában eddig nem volt mérhető hatása a könyvben tárgyalt tendenciákra, amelyek kiterjedt szabályozás alatt születtek meg. Ha nem kell az egész világra kiterjedő totalitáriánus államtól tartanunk, a technikai fejlődés hátterében álló gazdasági és egyéb erők gyarapodása csak előnyökkel fog szolgálni.

Vegyük például az őssejtkutatást, ami kiváltképp ellentmondásos terület, és aminek támogatását az Egyesült Államok kormánya korlátozza. Az őssejtkutatás csak egy a biotechnológiai forradalom részeként előtérbe került számos gondolat közül, amelyek a biológiai információs folyamatok irányításával és befolyásolásával kapcsolatosak. A sejterápiák területén kialakult, az embrió-őssejtkutatást illető vita is csak azt érte el, hogy más módszerek alakultak ki ugyanannak a célnak az elérésére. Például a transzddifferenciáció (amikor egyfajta sejtet, mondjuk egy bőrsejtet másfajta sejtekké alakítanak) meglehetősen gyorsan fejlődik.

Mint már az ötödik fejezetben szó esett róla, a tudósok nemrégiben bebizonyították, hogy képesek más típusú sejtekké újraprogramozni a bőrsejteket. Ez a megközelítés jelenti a sejterápiák Szent Grálját, amennyiben a beteg saját DNS-ét tartalmazó differenciált sejtek végtelen készletét ígéri. Arra is jó, hogy a sejteket DNS-hibák nélkül kiválasszuk, és végül meghosszabbított telomerláncok fognak a rendelkezésünkre állni (a sejtek fiatalításához). Még az embrió-őssejtkutatás is fejlődött, például a

harvardi új kutatóközponttal és az összejt munkát támogató sikeres hárommilliárd dolláros kaliforniai alap kezdeményezésével.

Bár az összejtkutatást szabályozni hivatott folyamatok szerencsétlenül alakultak, nem mondhatjuk, hogy ez jelentősen visszavetette volna a sejttérápia-kutatást, nem is beszélve a biotechnológia szerteágazó területéről.

Néhány kormánymegszorítás a fundamentalista humanizmus nézőpontját tükrözi, amelyről az előző fejezetben ejtettem szót. Például az Európa Tanács kinyilatkoztatta, hogy „az emberi jogok között szerepel olyan génminta öröklésének a joga, amelyet mesterségesen nem változtattak meg”.^[760] A Tanács rendeletének talán legérdekesebb aspektusa az, hogy egy korlátozást jogként tüntet fel. Feltételezem, a Tanács ugyanebben a szellemben felkarolná azt az emberi jogot is, hogy a természetes betegségek ne kerüljenek gyógyításra mesterséges módszerrel, pont úgy, ahogyan az aktivisták „megvédték” az éhező afrikai nemzeteket a biológiailag módosított termények fogyasztásától.^[761]

A technológiai fejlődés végső haszna majd felülkerekedik az ilyen reflexív technológiaellenes érzületeken. Az Egyesült Államok terményeinek nagy része génmódosított, míg az ázsiai országok agresszív ütemben teszik magukévá a technológiát, hogy élelmezni tudják nagyszámú lakosságukat, és még Európa is elkezdte jóváhagyni a génmódosított élelmiszereket. A kérdés fontos, mert a felesleges korlátozások, akármilyen átmenetiek is, több millió ember szenvedését súlyosbíthatják. Ám a technikai fejlődés több ezer fronton tör előre, az ellenállhatatlan gazdasági haszon és az emberi egészségügybe, valamint jólétbe történő nagymértékű beruházások hatására.

Leon Fuerth fentebb idézett kommentárja rávilágít egy mélyen gyökerező tévhitre az információs technológiákkal kapcsolatban. Az információs technológiák nem csak az elit számára elérhetőek. Mint már kifejtettem, a kívánatos információs technológiák gyorsan elterjednek, és szinte ingyenessé válnak. Csak olyankor drágák, az elérhetőségük olyankor korlátozott, amikor nem működnek még elég jól (azaz a korai fejlődési szakaszaikban).

Az évszázad második évtizedében az internet teljes bemerülést kínáló audiovizuális virtuális valóságot kínál majd felhasználóinak, amelyben a képek szemüvegünkről és lencséinkről közvetlenül a retinánkra íródnak, továbbá rendkívül széles sávú, ruhánk által közvetített, drót nélküli internetelésre számíthatunk. Ezek a lehetőségek nem csak a kiváltságosoknak szólnak. A mobiltelefonokhoz hasonlóan, mire jól fognak működni, addigra már tele lesz velük a világ.

A 2020-as években már nem lesz meglepő az, hogy nanobotok úszkálnak a vérünkben és egészségben tartanak, valamint felerősítik mentális képességeinket. Mire ezek az eszközök jól működnek, addigra olcsókká válnak és széles körben elterjednek. Mint fentebb utaltam rá, az információs technológiák korai és késői felhasználói szakasza között eltelt idő is felgyorsul, és két évtizeden belül a jelenlegi tízéves időszakról néhány évesre csökken. Ha a nem biológiai intelligencia megveti a lábát az agyunkban, kapacitását legalább évente megduplázza, hiszen ez az információs technológia természete. Így nem kerül sok időbe, és az intelligenciánk nem biológiai része kerül túlsúlyba. Ez a lehetőség nem csupán a gazdagoknak tartogatja magát, hiszen például a mai keresőprogramokat is mindenki használhatja. És amennyiben kialakul a vita az ilyen biológiai erősítés jótékony hatásairól, könnyű megjósolni, melyik oldal fogja megnyerni, hiszen a felerősített intelligenciájú egyének sokkal jobb vitázók is egyben.

A társadalmi intézmények elviselhetetlen lassúsága. Az MIT vezető kutatója, Joel Cutcher-Gershenfeld a következőt írja: „Csak az elmúlt másfél évszázad történeti ívét tekintve, politikai rezsimek egész sorát láthatjuk, amelyek mind egy korábbi dilemma megoldására születtek, de új

dilemmákat hagytak maguk után. Például a Tammany Hall-lal^[18] és a politikai pártfogó modellel nagy előrelépés történt a földbirtokos nemességre alapuló rendszerrel szemben – több ember vehetett részt a politikai folyamatokban. Ám probléma merült fel a pártfogó rendszerrel is, amely a közszolgamodellhez vezetett – ami radikális megoldást hozott a korábban fennálló helyzetre a meritokrácia bevezetésével. Aztán persze már a közszolgálat jelentett akadályt az innováció előtt, és most újra felfedezzük a kormányt. És a történet folytatódik”.^[762] Gershenfeld arra hívja fel a figyelmet, hogy a társadalmi intézmények, ha a saját idejükben innovatívnak is számítanak, „terhessé válnak az újítás szempontjából”.

Először is, a társadalmi intézmények konzervativizmusa nem új keletű jelenség, hanem az innováció evolúciós folyamatának része, és a gyorsuló megterülések törvénye mindig is ebben a kontextusban működött. Másodszor, az innováció szokás szerint megkerüli az intézmények által állított határokat. A decentralizált technológia elérkezte felhatalmazza az egyént, hogy mindenféle korlátozást áthágjon, továbbá elsődleges szerepe van a társadalmi változás felgyorsításában. Egy példa a sok közül: a jelenleg kialakuló point-to-point technikák, például az internetes hangátviteli protokoll (VOIP) éppen most készülnek megkerülni a kommunikációs szabályozás áthatolhatatlan bozótját.

A virtuális valóság egy másik olyan jelenséggé válik majd, amely ösztökéli a társadalmi változást. Az emberek végül olyan kapcsolatokat teremthetnek és olyan tevékenységeket folytathatnak teljes bemerülést kínáló és módfelett realisztikus virtuális környezetekben, amelyeket a valóságban nem tudnának vagy nem akarnának.

A technológia komplexebbé válása során egyre emberibb képességeket vesz magára és mind kevesebb adaptációt igényel majd. Az első személyi számítógépek használatához technikai szakértelemre volt szükség, míg a mai gépesített rendszerek, úgymint a mobiltelefonok, zenelejátszók és webböngészők használata sokkal kevesebb technikai tudást igényel. Az évszázad második évtizedében napi szinten fogunk virtuális emberekkel érintkezni, akik annak ellenére, hogy még nem mennének át a Turing-teszten, természetes nyelvértésükkel mindenféle elképzelhető feladatot tekintve személyes asszisztenseinkként működhetnek.

Az új paradigmák korai és kései felhasználói mindig is keveredtek. Ma is látunk olyanokat, akik úgy élnek, mint elődeink a hetedik században. Ez nem tartja vissza a korai felhasználókat attól, hogy új attitűdöket és társadalmi konvenciókat, például internetalapú közösségeket alakítsanak ki. Néhány évszázada csak maroknyi ember, mint Leonardo da Vinci és Newton kutatta a világhoz való viszonyulás új útjait. Ma az új technológiák alkalmazásának társadalmi innovációjában részt vevő világméretű közösség a népesség jelentős részét teszi ki, ami szintén a gyorsuló megterülések törvényét tükrözi.

A teista kritika

Egy másik gyakori ellenérv vállaltan túlmegy a tudományon, és úgy tartja, hogy létezik az emberi képességeknek egy spirituális szintje, amely objektív eszközökkel nem kifürkészhető. William A. Dembski, a kiváló filozófus és matematikus, ledorongolja az olyan gondolkodók, mint Marvin Minsky, Daniel Dennett, Patricia Churchland és Ray Kurzweil látásmódját, akiket „kortárs materialistáknak” nevez, mondván, hogy ezek az emberek „az anyag mozgását és változását elegendő magyarázatnak tartják az emberi elme belső életére”.^[763]

Dembski a „kiszámíthatóságot [tartja a] materializmus legfőbb erényének” és „az ürességet a legfőbb bűnének”. Szerinte „az embereknek vannak vágyaik. Szabadságra vágyunk, halhatatlanságra

és istenlátásra. Nyugtalanok vagyunk, amíg meg nem találjuk Isten nyugalmát. A materialista problémája azonban az, hogy ezeket a vágyakat nem lehet az anyag filléreire megváltani”. Végül azzal zárja érvelését, hogy az emberek nem lehetnek pusztá gépek, mert „ezen rendszerekből mindennemű anyagon kívüli tényező hiányzik”.

Szerintem Dembski elképzelését a materializmusról „képesség-materializmusnak”, vagy még inkább, „képesség-mintaizmusnak” kell nevezni. A képesség-materializmus/mintaizmus azon a felismerésen alapul, hogy a biológiai idegsejtek és kapcsolataik az anyag és energia fenntartható mintáiból állnak. Azt is hirdeti, hogy módszereik leírhatók, megérthetők és modellezhetők másolatok vagy funkcionálisan egyenértékű, újraalkotott entitások segítségével. A „képesség” szót használom, mert kifejezi mindazt a gazdag, kifinomult és sokféle kapcsolatot, amit az emberek a világgal ápolnak, nemcsak a korlátozottabb intellektuálisnak nevezett készségeket. Képességünk, hogy megértsük és válaszoljunk az érzelmekre, legalább olyan komplex és szerteágazó, mint az, hogy képesek vagyunk intellektuális témákat feldolgozni.

Searle például elismeri, hogy az emberi idegsejtek biológiai gépek. Kevés komoly gondolkodó tételezett fel olyan képességeket vagy emberi idegsejt-reakciókat, amelyeknek szüksége volna Dembski „anyagon kívüli tényezőire”. Az, hogy az anyag és energia mintáira hagyatkozunk az emberi agy és test viselkedésének és tudásának megmagyarázásakor, nem kell, hogy lecsökkentse élvezetünket, amikor megcsodáljuk rendkívüli minőségeit. Dembski elavult képet ápol a „gép” fogalmáról.

Azt is írja, hogy „az aggyal szemben a számítógépek tiszták és precízek... a komputerok determinisztikusan működnek”.

Ez a mondat és a hozzá hasonló egy sor gépet vagy entitást idéz fel előttem, amelyek anyag és energia mintáiból állnak („materiális” entitások), azaz a XIX. századi automaták egyszerű gondolkodású mechanizmusaira korlátozódnak. Ezek a több száz vagy akár több ezer darabból álló eszközök kiszámíthatóak voltak, és bizonyosan nem tudtak szabadság után vagy az emberek által tanúsított egyéb megnyerő tulajdonságok után vágyakozni. Ugyanezek a megállapítások érvényesek mai, több milliárd részből álló gépeinkre is. Ám ugyanez nem feltétlenül mondható el a *több milliószor milliárd*, egymással kölcsönhatásban álló „alkatrészből” álló gépekre, amelyek az emberi agy és test komplexitásával rendelkeznek.

Továbbá hibás megállapítás az, hogy a materializmus kiszámítható. Még a mai számítógépprogramok is napi szinten használják a szimulált véletlenszerűséget. Ha igazán véletlenszerű eseményekre van szükség egy folyamatban, léteznek olyan eszközök, amelyek ezt is tudják. Alapvetően minden, amit az anyagi világban megfigyelünk, sok billió kvantum-esemény eredménye, amelyeknek mindegyike a fizikai valóság középpontjában mutatja a mélységes és nem redukálható kvantum-véletlenszerűséget (vagy legalábbis úgy látszik – a tudományos esküdszék még mindig a kvantum-események mögött húzódó látszólagos véletlenszerűség valódi természetét kutatja). Az anyagi világ – makro- és mikroszinten egyaránt – minden, csak nem kiszámítható.

Bár sok számítógépprogram működik a Dembski által leírt módon, a saját mintafelismerési területemen uralkodó technikák a biológiai megoldások ihlette kaotikus számítástechnikai módszereket alkalmaznak. Ezekben a rendszerekben a több millió, sok esetben véletlenszerű és kiszámíthatatlan elemeket tartalmazó folyamat kiszámíthatatlan kölcsönhatása nem várt, ám megfelelő válaszokat ad a felismerés kifinomult kérdéseire. Az emberi intelligencia túlnyomó része éppen ilyen mintafelismerő folyamatokból áll.

Ami az érzelmekre adott reakcióinkat és emelkedettebb törekvéseinket illeti, ezeket helyesen

emergens tulajdonságokként kell felfogni – nem kétséges, hogy mélyrehatóak, de mindenesetre emergens minták, amelyek az emberi agy komplex környezetével ápolts kölcsönhatásából erednek. A nem biológiai lények komplexitása és képességei exponenciálisan növekednek, és néhány évtizeden belül eléri a biológiai rendszerekét, amilyen az emberi agy is (az idegrendszer és az endokrin rendszer többi részével együtt). A jövő gépeit a biológia ihleti majd – tehát biológiai felépítéseket másolnak. (Ez már sok mai rendszerre is igaz.) Azt állítom, hogy a komplexitás és az emberi agy tényleges mintáinak megosztásával ezek a nem biológiai entitások az emberek intelligenciájával és érzelmileg gazdag reakcióival (mint például a „vágyódás”) fognak rendelkezni.

Tudatosak lesznek-e ezek a nem biológiai entitások? Searle szerint könnyedén megválaszolhatjuk ezt a nehéz kérdést (legalábbis elméletben) úgy, hogy megbizonyosodunk arról, az adott entitás rendelkezik-e a megfelelő „specifikus neurobiológiai folyamatokkal”. Hiszek abban, hogy sok ember, majd végül az emberek nagy többsége el fogja hinni, hogy az emberi eredetű, ám mégis nem biológiai intelligens entitások rendelkeznek tudattal, de ez politikai és pszichológiai jóslat a részemről, nem pedig tudományos vagy filozófiai ítélet. Mindent összevetve tehát egyetértek Dembskivel abban, hogy mindez nem tudományos kérdés, mert nem lehet objektív megfigyeléssel eldönteni. Vannak, akik azt mondják, hogy ha nem tudományos kérdés, akkor nem fontos vagy nem is valódi kérdés. Nézetem szerint (és biztosra veszem, hogy Dembski egyetért velem), mivel a kérdés nem tudományos jellegű, éppen ezért filozófiai kérdés – valójában a legalapvetőbb filozófiai kérdés.

Dembski azt írja: „Meg kell haladnunk magunkat ahhoz, hogy megtaláljuk magunkat. Ám az anyag mozgása és változása nem kínál lehetőséget önmagunk meghaladására... Freud... Marx... Nietzsche..., mind önámításnak gondolta a transzcendencia álmát.” A transzcendencia mint végső cél ésszerű elképzelés. Azonban nem értek egyet azzal, hogy a materiális világ „nem kínál lehetőséget önmagunk meghaladására”. Az anyagi világ eredendően fejlődik, és mindegyik állapota meghaladja az előzőt. Mint a hetedik fejezetben kifejtettem, az evolúció a nagyobb komplexitás, több elegancia, több tudás, nagyobb intelligencia, több szépség, több kreativitás, több szeretet felé halad. Istent is így határozzák meg, csak korlátozás nélkül: végtelen tudásnak, végtelen intelligenciának, végtelen szépségnek, végtelen kreativitásnak, végtelen szeretetnek. Az evolúció nem éri el a végtelen szintjét, de exponenciális robbanása közben egyértelműen abba az irányba halad. Így tehát az evolúció elkerülhetetlenül istenképünk felé törekszik, bár soha nem éri el ezt az ideált.

Dembski így folytatja:

„Egy gépet hiánytalanul meghatároz a szerkezete, dinamikája és a fizikai alkatrészei közötti belső kapcsolatok. A »gép« elnevezés az anyagon kívüli tényezők hiányát hangsúlyozza. A helyettesítési elv fontos ebben a vitában, hiszen azt sugallja, hogy a gépeknek nincsen szilárd történetük... De egy gépnek nincsen a szó szoros értelemben vett története. Előélete nélkülözhető toldalék – olyan pótlék, ami lehetett volna akár másmilyen is a gép megváltoztatása nélkül... A gép csak annyi, amennyi az adott pillanatban... A gépek hozzáférnek vagy nem férnek hozzá a tárolt adatokhoz... Mutatis mutandis, a tényeknek ellentmondó (azaz soha meg nem történt dolgokról mesélő) előéletről szóló, ám elérhető adatok a gép szempontjából akár meg is történhettek volna.”

Nem nagyon kell bizonygatni, hogy ennek az egész könyvnek a lényeges mondanivalója az, hogy sok, a gépekről és saját magunkról vallott dédelgetett feltételezésünk megkérdőjeleződik az elkövetkező néhány évtizedben. Dembski „történelemképe” az emberi mivoltunk egy másik oldala,

ami szükségszerűen az emberi lét gazdagságából, mélységéből és komplexitásából ered. Ellenben a Dembski-féle előtörténet hiánya csak az eddig megismert gépek egyszerűségének újabb példája. Az én álláspontom éppen az, hogy a 2030-as évek gépei és a későbbi gépek túl olyan nagy komplexitásra és szervezeti gazdagságra tesznek szert, hogy viselkedésük bizonyítja majd: bírnak érzelmi reakciókkal, vágyakkal és igen, történelemmel is. Így hát Dembski mindössze csak a mai korlátolt gépeket írja le, és feltételezi, hogy ezek a korlátok eredendően a gépek tulajdonságai, amivel gyakorlatilag azt is mondhatná, hogy „napjaink gépei nem tudnak annyit, mint az emberek, így hát a gépek soha nem fogják elérni ezt a teljesítményszintet”. Dembski csak feltételezés alapján jut el a következtetéshez.

Úgy gondolja, a gépek értő viszonyulása saját előéletükhöz a tárolt adatok előhívásának függvénye. A jövő gépei azonban nemcsak a rögzített múltat fogják hordozni, hanem képességet, amellyel megérthetik a történetet, és éleslátón reflektálhatnak is rá. Ami „a tényeknek ellentmondó dolgokat” illeti, ugyanez elmondható az emberi emlékezetéről is.

Dembski hosszadalmasan tárgyalja a spiritualitás kérdését, amit röviden a következőképpen foglal össze:

„De miként lehet ez a gép tudatában Isten jelenlétének? Ne felejtsük el, hogy a gépeket teljességben felépítésük, dinamikájuk és fizikai összetevőik kapcsolatai határozzák meg! Ebből következik, hogy Isten nem adhatja jelenlétét a gép tudtára azáltal, hogy hatással van rá és megváltoztatja az állapotát. Ugyanis, amint Isten hat a gépre, hogy megváltoztassa az állapotát, a gép szigorúan véve többé már nem gép, hiszen egy aspektusa meghaladta fizikai összetevőit. Ebből az következik, hogy ha a gép észleli Istent, annak Isten hatásától és a gép állapotának megváltoztatásától függetlenül kell történnie. Akkor hogyan ébredhet rá egy gép Isten jelenlétére? A ráébredésnek belülről kell megtörténnie. A gépi spiritualitás az önmegvalósítás spiritualitása, nem egy cselekvő Isten spiritualitása, aki kész felfedni magát az önmegvalósítás kedvéért, és így átalakítja a vele szövetségbe lépő, neki áldozó lényeket. Ahhoz tehát, hogy Kurzweil a »gépet« a »spirituális« jelzővel módosítsa, igencsak szegényes spiritualitáskép szükségeltetik.”

Dembski azt állítja, hogy egy entitás (például egy személy) nem lehet tudatában Isten jelenlétének anélkül, hogy Isten hatna rá, ám Isten nem tud hatni egy gépre, így tehát egy gép nem lehet tudatában Isten jelenlétének. Ez az érvelés teljességgel körkörös és emberközpontú. Isten csak emberekkel lép szövetségre, és ezek közül is csak biológiai emberekkel. Nem ellenzem Dembski személyes elképzeléseit és hitét, de az biztos, hogy az ígért „perdöntő bizonyítékot” arra, hogy „emberek nem gépek – pont”, nem adja elő. Searle-höz hasonlóan ő is csak feltételezésekből jut el a végkövetkeztetésig. Searle-höz hasonlóan Dembski sem képes megragadni az összetett eloszlású mintákban megjelenő emergens sajátosságok gondolatát. Azt írja:

„A harag feltételezhetően bizonyos elszigetelt agyi ingerlésekkel van összefüggésben. Ám az elszigetelt agyi ingerek nemigen adnak kielégítőbb magyarázatot a harag jelenségére, mint a haraggal összefüggő nyílt viselkedésminták, például a szitkozódás. Lehet, hogy az elszigetelt agyi ingerek bizonyíthatóan összekapcsolhatók a haraggal, de mi magyarázza azt, hogy az egyik ember szitokként értelmez egy adott megjegyzést és ez

haragot vált ki belőle, míg a másik ember viccnek fogja fel ugyanazt és nevetésben tör ki? Az elmét tisztán materialista módon magyarázónak az elszigetelt agyi ingereket más elszigetelt agyi ingerekkel kapcsolatban kell értelmeznie. Ehelyett az elszigetelt agyi ingereket (például a haragot megjelenítőket) szemantikai tartalmak (mondjuk szitkok) alapján kellene megmagyarázni. Ám az agyi ingerek és szemantikus tartalmak keveréke aligha adja az elme, vagy az intelligens cselekvő materialista magyarázatát.”

Dembski azt feltételezi, hogy a harag „elszigetelt agyi ingerekkel” van összefüggésben, ám a harag szinte bizonyosan az agytevékenység komplexen eloszló mintáinak eredménye. Még ha létezik is valami elszigetelt idegi inger, ami a haraggal van összefüggésben, az mindazonáltal szerteágazó és egymással kölcsönhatásban álló minták terméke. Ha válaszolni akarunk Dembski kérdésére, hogy miért reagálnak az egyes emberek különbözően hasonló helyzetekre, nem kell anyagon túli tényezők általi magyarázatokra hagyatkoznunk.

Az egyes emberi agyak és tapasztalatok természetesen különbözőek, ám ezeket a különbségeket jól magyarázzák a különböző génekből és tapasztalatokból következő sajátos agyszerkezeti különbségek.

Dembski megoldása erre az ontológiai problémára az, hogy a létező dolgok legvégső alapja az általa „a dolgok valóságos világának” nevezett világ, ami nem redukálható materiális jelenségekre. Dembski nem sorolja fel, milyen „dolgokat” kell alapvetőnek tartanunk, de az emberi elmék szerepelnek a listán, ahogyan egyéb dolgok is, mint például pénz és székek.

Ám lehetséges, hogy ezen a téren kismértékben mégis egyezik a véleményünk. Én Dembski „dolga” mintáknak értelmezem. A pénz például megállapodásokból, értelmezésekből és elvárásokból álló egyetlen kiterjedt és folytatólagos minta. A „Ray Kurzweil” talán nem ennyire kiterjedt minta, de eddig legalábbis folytonos. Dembski láthatóan mulékonynak és nem anyagnak tartja a mintákat, ám én mélyen hiszek a minták erejében és tartósságában. Nem ostobaság a mintákat alapvető ontológiai valóságnak látni. Az anyagot és energiát közvetlenül nem érzékelhetjük nyers formáiban, de a Dembski „dolgai” mögött húzódó mintákat közvetlenül tapasztaljuk. Ez a tézis arra a feltételezésre alapul, hogy amikor intelligenciánkat és intelligenciánk technológiának nevezett kiterjesztését használjuk arra, hogy megértsük a világunkban működő erőteljes mintákat (például az emberi intelligenciát), ezeket a mintákat újrateremthetjük – és kiterjeszthetjük – más szubsztrátumokra is. A minták fontosabbak, mint az őket megtestesítő anyagok.

Végezetül, ha Dembski intelligenciaerősítő anyagon kívüli jelensége valóban létezik, akkor jó lenne tudni, hol szerezhetek magamnak is.

A holista kritika

A másik gyakori kritika a következőt állítja: a gépek modulok szigorúan szervezett struktúrái, miközben a biológiai felépítés holisztikusan szervezett elemekből áll, ahol minden elem hat minden másra. A sajátos biológiai adottságok (mint például az emberi intelligencia) csak ebből a fajta holisztikus felépítésből származhatnak. Továbbá ez a rendezőelv csak a biológiai rendszerekben érhető tetten.

Michael Denton, az új-zélandi Otago Egyetem biológusa felhívja a figyelmet a biológiai lények és az általa ismert gépek rendezőelvei között látható különbségekre. Denton az élőlényeket ékesszólóan „önszerveződőnek, önhivatkozóknak, (...) önmásolóknak, (...) reciprokálisnak, (...) önformálóknak és holisztikusnak” tartja.^[764] Aztán bárminemű bizonyítás nélkül arra a következtetésre – úgy is

mondhatjuk, hittételre – jut, hogy az ilyen organikus formák csak biológiai folyamatok során alakulhatnak ki, és hogy az ilyen formák a lét „változtathatatlan, (...) kifürkészhetetlen és (...) alapvető” valóságai.

Magam is osztozom Denton „lenyűgözöttségében és (...) csodálatában” a szerves rendszerek szépsége, bonyolultsága, idegensége és egymással való összefüggése láttán, amely a „kísérteties és túlvilági”, aszimmetrikus fehérjealakoktól a magasabb rendű szervek, például az emberi agy komplexitásáig terjed. Továbbá egyetértek Dentonnal abban, hogy a biológiai felépítésben mélyen gyökerező alapelvek tükröződnek. Azonban az én állításom pontosan az, hogy ugyanezekhez az alapelvekhez a gépek (azaz az emberalapú tervekől eredeztethető entitások) is hozzáférnek – sőt már használják is azokat –, ám ezt sem Denton, sem a holisztikus kritika bármely képviselője nem ismeri el és nem is méltatja válasza. Saját munkám lendületét is ez adja, egyben a jövő trendjeit is ez mozgatja. A természet megoldásainak emulálása a jövőbeli technológia által elérhetővé tett hatalmas erők megzabolázásának leghatékonyabb módja.

A biológiai rendszerek nem teljesen holisztikusak, és a kortárs gépek sem teljesen modulárisak; mindkettő folytonosságban létezik. A természetes rendszerek egyes működési egységeit akár molekuláris szinten is azonosíthatjuk, és a cselekvő mechanizmusok még jobban elkülöníthetők a szervek, illetve agyi területek magasabb szintjein. Már kezdjük érteni a meghatározott agyi területek működését és információfeldolgozó folyamatait, amint azt a negyedik fejezetben is hangsúlyoztam.

Hiba lenne azt állítani, hogy az emberi agy minden aspektusa minden más aspektusával kölcsönhatásban van, és hogy ezért lehetetlen megismerni a működését. A kutatók már azonosították és modellezték az agy több tucat területének információfeldolgozó mechanizmusait. Ugyanakkor számos példát ismerünk nem modulárisan megalkotott mai gépekre is, amelyekben a felépítés egyes aspektusai szoros kapcsolatban állnak egymással, mint például az ötödik fejezetben bemutatott genetikai algoritmusok. Denton azt írja:

„Ma szinte minden hivatásos biológus magáévá tette a mechanikai/redukcionista megközelítést, és azt feltételezik, hogy egy élő szervezet elsődlegesen és esszenciálisan az alapvető részeiből áll (akár egy óra a fogaskerekekből), hogy egy élő szervezet nem több, mint a részeinek összessége (akár egy óránál), és hogy a részei határozzák meg az egész tulajdonságait, valamint hogy egy szervezet minden tulajdonságának teljes leírását megkaphatjuk elkülönített részei összességének jellemzése által (akár egy óránál).”

Denton is figyelmen kívül hagyja az összetett folyamatok azon képességét, hogy olyan emergens tulajdonságokról adjanak tanúbizonyságot, amelyek meghaladják „elkülönített részeik összességét”. A természetnek ezt a képességét ismeri fel, amikor azt írja: „Nagyon valós értelemben a szerves formák (...) valóban emergens valóságokat reprezentálnak.” Azonban nemigen kell Denton „vitalista modelljére” hagyatkoznunk ahhoz, hogy megmagyarázzuk az emergens valóságokat. Az emergens tulajdonságok a minták erejéből következnek, és a mintákat, illetve emergens tulajdonságaikat semmi sem korlátozza a természetes rendszerekre.

Úgy tűnik, Denton nem tagadja a természetes folyamatok emulálhatóságának lehetőségét, hiszen így ír:

„Az új szerves formák fehérjékből való kialakítása tehát teljesen új megközelítést

igényel, egyfajta »a nagyból a kicsi felé« haladó tervezést. Mivel az organikus egész részei csak az egészben léteznek, az organikus egészeket nem lehet részenként meghatározni és viszonylag független modulok halmazából felépíteni; következésképpen az egész osztatlan egységet együtt, in toto kell meghatározni.”

Ebben a bekezdésben Denton hasznos tanácsot ad és épp azt a mérnöki hozzáállást mutatja be, amelyet én és más kutatók is nap mint nap használunk a mintafelismerés, komplexitás-(káosz-)elmélet és az önszerveződés területein. Azonban úgy látszik, nem ismeri ezeket a módszereket, és miután bemutatta a felfelé szerveződő, komponensalapú tervezés példáit és korlátaait, azzal a következtetéssel zárja a mondandóját, hogy áthidalhatatlan szakadék tátong a két mérnöki filozófia között. Pedig a hidat valójában már építik.

Mint azt az ötödik fejezetben kifejtettem, megalkothatjuk a saját „kísérteties és túlvilági”, ám hatékony struktúráinkat az alkalmazott evolúció segítségével. Leírtam, miként lehet az evolúció alapelveit alkalmazni az intelligens minták létrehozásában genetikai algoritmusok segítségével. Saját, e területen szerzett tapasztalataim szerint az eredményeket jól példázzák Denton organikus molekulái, „a struktúra látszólagos logikátlanságával, illetve bárminemű nyilvánvaló modularitás és rendszeresség hiányával, (...) az elrendezés kaotikus voltával (...) [és] a nem mechanikai felépítés ismertetőjegyével”.

A genetikai algoritmusok és egyéb alulról szerveződő tervmetodikák (mint a neurális hálók, a Markov-modellek és más, az ötödik fejezetben leírt módszerek) magukban hordozzák a kiszámíthatatlanság elemét, így az ilyen rendszerek eredménye minden folyamatfuttatás alkalmával más és más. A közhely ellenére, miszerint a gépek determinisztikusak és ennél fogva kiszámíthatóak, a folyamatba építhető véletlen számos könnyen elérhető forrása áll a rendelkezésükre. A kvantummechanika jelenlegi elmélete mélyreható véletlenszerűséget feltételez a lét legbelső középpontjában. Bizonyos irányzatai szerint, ami makroszinten a rendszer determinisztikus viselkedésének tűnik, az csupán a rengeteg, alapvetően kiszámíthatatlan eseményből következő statisztikai túlsúly eredménye. Továbbá Stephen Wolfram és mások munkássága bebizonyította, hogy még egy elméletben teljesen determinisztikus rendszer sem képes effektíve véletlenszerű, és – ami még fontosabb – teljesen kiszámíthatatlan eredményeket produkálni.

A genetikai algoritmusok és más hasonló önszervező megközelítések olyan felépítéseket eredményeznek, amelyeket nem lehetne moduláris, komponensalapú módszerrel elérni. A részeknek az egészhez viszonyított „idegensége, (...) káosza és (...) dinamikus kölcsönhatása”, amelyet Denton kizárólag a szerves struktúráknak tulajdonít, jól leírják az ember által kezdeményezett kaotikus folyamatok eredményeinek tulajdonságait.

A saját genetikai algoritmusokkal végzett munkám során megvizsgáltam, milyen folyamat játszódik le, amikor egy ilyen algoritmus fokozatosan javítja a struktúrát. Egy genetikai algoritmus nem az egyes alrendszerek egyenkénti megtervezésével alkotja meg a kívánt szerkezetet, hanem növekményen alapuló, „mindent egyszerre” megközelítéssel dolgozik, és a megoldás átfogó „képességeit” progresszíven javító, sok kisebb változtatást eszközöl a modellben. A megoldás maga fokozatosan bukkan elő, bomlik ki és jut el az egyszerűtől az összetettig. Míg a megoldások hatékonyságuk ellenére gyakran aszimmetrikusak és ormótlanak, csakúgy, mint a természetben, elegánsnak és szépnek is láthatjuk őket.

Denton helyesen jegyzi meg, hogy a legtöbb kortárs gépet, mint például a mai hagyományos számítógépeket, a moduláris módszerrel tervezték. Ennek a hagyományos technikának vannak

bizonyos műszaki előnyei. Például a számítógépek sokkal pontosabb memóriával rendelkeznek, mint az emberek, és sokkal hatékonyabban képesek logikai transzformációkat végrehajtani, mint a segítség nélkül maradt emberi intelligencia. De legfőképpen, a számítógépek azonnal meg tudják osztani a memóriájukat és a mintákat. A természet kaotikus nem moduláris jellege is jár bizonyos előnyökkel, amint azt Denton is említi, például az emberi mintafelismerés rendkívüli képességével. De egyáltalán nem indokolt logikai lépés ezek után azt állítani, hogy az emberalapú technológia mai (lassan eltűnő) korlátai miatt a biológiai rendszereket eredendően, akár logikusan, egy világ választja el a gépektől.

A természet csodálatos alkotásai (például a szem) mélyreható evolúciós folyamatból nyerték előnyeiket. A legkomplexebb mai genetikai algoritmusaink több tízezer bites genetikai kóddal rendelkeznek, míg az emberekhez hasonló biológiai entitások több milliárdnyi bitből álló genetikai kódokat tartalmaznak (tömörítéssel több tízmillió byte-nyit).

Azonban, mint minden információalapú technológia esetében, a genetikai algoritmusok és más, a természetet utánzó módszerek komplexitása exponenciálisan növekszik. Ha megvizsgáljuk ennek a komplexitásnak a növekedési rátáját, azt találjuk, hogy körülbelül két évtized múlva beéri az emberi intelligencia komplexitását, ami egybecseng a jelenlegi hardveres és szoftveres trendekből nyert becsléseimmel.

Denton felhívja a figyelmet, hogy eddig még nem sikerült háromdimenziósra hajtogatnunk a fehérjéket, „még egy 100 komponensűt sem”. Azonban csak az elmúlt néhány évben jutottunk olyan eszközökhöz, amelyekkel egyáltalán meg tudjuk jeleníteni e háromdimenziós minták képi megfelelőit. Továbbá az atomok közti erők modellezése körülbelül százezer milliárd (10^{14}) számolást fog igényelni szekundumonként. 2004 végén az IBM bemutatta Blue Gene/L szuperszámítógépe hetven teraflopos (majdhogynem 10^{14} cps) kapacitású új verzióját, amely, ahogyan a neve is utal rá, talán képessé tesz bennünket a fehérjehajtogatás szimulálására.

Már sikerült szétvágnunk, hasítanunk és átrendezni a genetikai kódokat, és munkába fogjuk a természet saját biokémiai gyárait enzimek és egyéb komplex biológiai vegyületek előállítására céljából. Igaz, hogy a legtöbb ilyesfajta kortárs munka két dimenzióban zajlik, ám nem kell már sokáig várni a természetben található, lényegesen komplexebb háromdimenziós minták megjelenítéséhez és modellezéséhez szükséges számítástechnikai források megszületésére.

Amikor Dentonnal személyesen megtárgyaltuk a fehérjék kérdését, elfogadta, hogy a probléma végül majd megoldódik, és az ehhez szükséges időt körülbelül egy évtizedre becsülte. Az, hogy eddig még nem értünk el bizonyos technikai vívmányokat, nem indokolja, hogy soha nem is fogjuk azokat megvalósítani. Denton azt írja:

„Lehetetlen a gének ismeretéből megjósolni egy élőlény kódolt organikus formáit. A gének és elsődleges termékeik, az aminosavak lineáris szekvenciáinak legalaposabb elemzéséből sem lehet az egyes fehérjék vagy a magasabb rendű formák – riboszómák és egész sejtek – tulajdonságaira vagy struktúrájára következtetni.”

Bár Denton fenti megállapítása alapvetően helyes, lényegében azt mondja, hogy a genom csak része az egész rendszernek. A DNS-kód távolról sem ad kimerítő jellemzést, és a molekuláris támogató rendszer többi részének ismerete is szükségeltetik az egész rendszer működéséhez és megértéséhez. A DNS-gépezet működésének megértéséhez szükség van a riboszómák és egyéb molekulák felépítésének ismeretére is. Azonban ezeknek a felépítéseknek a hozzáadása nem változtatja meg jelentősen a biológiai tervinformáció mennyiségét.

Am az emberi agy hallatlanul párhuzamos, digitálisan vezérelt, analóg, hologramszerű, önszerveződő és kaotikus folyamatainak újrateremtéséhez nincsen szükségünk a fehérjehajtogatásra. Mint azt a negyedik fejezetben is említettem, több tucatnyi jelenlegi projekt létezik, amelyeknek sikerült megalkotni az idegrendszer egyes részeinek másolatát. Ilyenek például az emberek agyában fehérjehajtogatás nélkül is sikeresen működő idegi implantátumok. Azonban míg elfogadom, hogy Denton érvei a fehérjéről a természet holisztikus működését hivatottak bizonyítani, mint már utaltam rá, lényegében nincsenek elvi akadályai annak, ha a technológiánkkal emulálni akarjuk ezeket, és már jócskán elindultunk ezen az úton.

Összefoglalva azt mondhatom, Denton túl hamar vonja le azt a következtetést, hogy az anyag és energia komplex fizikai rendszerei nem képesek megjeleníteni az „élőlények emergens, (...) létfontosságú tulajdonságait, mint az önsokszorosítás, »átalakulás«, önregenerálás, önszervezés és a biológiai felépítés holisztikus rendje”, és hogy ezért „az élőlények és gépek a lét külön kategóriáit testesítik meg”. Dembski és Denton ugyanazt a korlátozott nézetet vallja, miszerint a gépek olyan entitások, amelyeket csak modulárisan lehet tervezni és megépíteni. Képesek vagyunk építeni, és már építünk is olyan „gépeket”, amelyek messze erőteljesebb képességekkel rendelkeznek, mint alkotórészeik összessége, és amelyek a természetes világ önszervező elveit ötvözik emberi technológiánk egyre gyorsuló képességeivel. Annyi bizonyos, hogy ez félelmetes erejű ötvözet lesz.

„Nem tudom, milyennek tűnhetek a világ szemében, saját magamat mindig csak a tengerparton játszadozó kisfiúnak látom, aki önnönmagát szórakoztatja azzal, hogy időről időre ráakad egy még simább kavicsra, a többinél is szebb kagylóra, mialatt az igazság hatalmas óceánja felfedezetlenül terül el előttem.”

(Isaac Newton)^[763]

„Az élet értelme a kreatív szeretet. Nem belső érzésként értem most a szeretetet, nem szentimentális magánérzelemként, hanem arra a szeretetre gondolok, ami dinamikus erőként halad és alkot eredetét a világban.”

(Tom Morris, Ha Arisztotelész irányítaná a General Motorst)

„Egy exponenciális sem tart örökké... de az »örökkét« késleltetni lehet.”

(Gordon E. Moore, 2004)

Mennyire szinguláris? Mennyire szinguláris a szingularitás? Egy másodperc alatt zajlik majd le? Vessünk még egy pillantást a szó eredetére! A matematikában a szingularitás egy minden korláton túl lévő érték – gyakorlatilag a végtelen. (Formálisan arra a függvényre, amelyik szingularitást tartalmaz, azt mondják, hogy a szingularitási pontban nincs definiálva, de megmutatható, hogy az ahhoz közeli pontokban a függvény értéke meghalad bármely tetszőleges véges értéket.)^[766]

A szingularitás, amint arról a könyvben is szó volt, nem fog elérni végtelen számítási kapacitást, memóriát; semmilyen mérhető jellemzőjében nem lesz végtelen. De az egészen bizonyos, hogy mindegyikben igen magas szintre jut majd, beleértve az intelligenciát is. Az emberi agy működésének megfejtésével képesek leszünk elképesztően hatékony számítási közegbe helyezni az emberi intelligencia párhuzamos, önszervező, kaotikus algoritmusait. Ez az intelligencia aztán képes lesz iteratív lépésekben, folyamatosan gyorsuló módon fejleszteni saját tervrajzait – mind a hardvert, mind a szoftvert.

Ennek ellenére úgy tűnik, mégis van határ. Egyelőre úgy néz ki, a világegyetem csak 10^{90} számítást képes támogatni másodpercenként, mint azt a hatodik fejezetben megvitattuk. Léteznek a holografikus világegyetem elméletéhez hasonló elképzelések, amelyek magasabb számokra utalnak (például 10^{120}), de még ezek a számok is értelemszerűen végesek.

Természetesen egy ilyen nagyságrendű intelligencia gyakorlatilag végtelennek tűnne a jelenlegi intelligenciaszintünkkel mérve. Egy 10^{90} számítás/másodperc intelligenciával átitatott világegyetem egybillió billió billió billió billiószor többre lenne képes, mint ma az összes biológiai emberi agy a Földön.^[767] Még egy egykilós „hideg” számítógépnek is 10^{24} számítás/másodperc a csúcsteljesítménye, amint azt a harmadik fejezetben láttuk, ez pedig tízbilliárdszor (10^{16}) nagyobb teljesítmény az összes biológiai emberi agynál.^[768]

Ha csak a hatványokat nézzük, könnyedén tudnánk még magasabb számokkal dobálózni, még ha ahhoz nem is elég élénk a fantáziánk, hogy elképzeljük, azok mivel járnának. Elképzelhetjük, hogy a jövőbeli intelligenciánk netán áttérjed más világegyetekbe. Egy ilyen eshetőség nem kizárt mindazok alapján, amit ma a kozmológiából értünk, bár erősen spekulatív. Ez lehetővé tenné, hogy jövőbeli intelligenciánk minden határt átlépjen. Ha képessé válnánk arra, hogy más világegyetemet alkossunk és gyarmatosítsunk (ha ez egyáltalán lehetséges, úgy az eljövendő civilizáciánk hatalmas

intelligenciája képes lesz kiaknázni), az intelligenciánk végül minden meghatározott véges szintet meghaladhatna. És ez pont ugyanaz, mint amit a szingularitásról elmondhatunk a matematikai függvények esetében.

Mennyiben közös az emberi történelemre vonatkoztatott „szingularitás” kifejezés a fizikában használatossal? A szót a matematikából kölcsönözte a fizika, mely utóbbi mindig is kedvelte az antropomorfizáló megfogalmazásokat (gondoljunk csak a charm [*bájos*] vagy a strange [*furcsa*] nevű kvarkokra). A fizikában a „szingularitás” elvileg egy nulla kiterjedésű, végtelen sűrűségű pont, ahol következésképpen a gravitációs mező jellemzői is végtelenek.

De a kvantumbizonytalanság miatt valójában nincs végtelen sűrűségű pont, és a kvantummechanika nem is engedélyezi a végtelen mennyiségeket.

A jelen könyvben tárgyalt szingularitáshoz hasonlóan a szingularitás a fizikában is elképzelhetetlenül nagy mennyiségeket jelöl. És a fizikában az érdekes térrész nem igazán nulla kiterjedésű, hanem egy eseményhorizontról van szó, a fekete lyuk (ami még csak nem is fekete) belsejében található elméleti szingularitási pont körül. Az eseményhorizonton belülről energia vagy részecskék – például fény – nem tudnak megszökni a túl erős gravitáció miatt. Ennek megfelelően az eseményhorizonton kívülről nem tudjuk könnyen, minden kétséget kizáróan megállapítani, mik történnek azon belül.

De valahogy mintha mégis bele lehetne látni egy fekete lyukba, mert a fekete lyukakból is távoznak részecskék. Részecske-antirészecske párok képződnek az eseményhorizont közelében (mint mindenütt az űrben), és némelyik pár esetében a pár egyik felét beszippanlja a fekete lyuk, a másik felének viszont sikerül megszöknie. Ezek a megszökött részecskék alkotják a Hawking-sugárzás néven ismert jelenséget, melyet felfedezőjéről, Stephen Hawkingről neveztek el. Pillanatnyilag az uralkodó nézet szerint ez a sugárzás tükrözi (kódolva, a bent rekedt részecskékkel való kvantumos összefonódás révén), hogy mi történik a fekete lyuk belsejében. Hawking eredetileg nem fogadta el ezt a magyarázatot, de manapság mintha már egyetértene vele.

Kiderül hát, hogy az, ahogy ebben a könyvben használtuk a „szingularitás” kifejezést, semmivel sem kevésbé helytálló, mint ahogy azt a fizikában alkalmazzák. Éppolyan nehéz átlátni egy fekete lyuk eseményhorizontján, mint ahogy a bekövetkező történelmi szingularitás eseményhorizontján. Hogyan is lennénk képesek mi, a magunk 10^{16} – 10^{19} számítás per másodpercre korlátozott agyával elképzelni, milyen lehet a civilizáció 2099-ben, amikor már a gondolkozásunk 10^{60} számításra lesz képes másodpercenként? Ennek ellenére úgy, ahogy a fekete lyukak természetéről is levonhatjuk a megfelelő következtetéseket a fogalmi gondolkodás segítségével, annak dacára, hogy sosem jártunk odabenn, a gondolkodásunk már ma is elég fejlett ahhoz, hogy értelmes meglátásokat tehessünk a szingularitás hatásairól. Ezt próbáltam meg ebben a könyvben.

Emberközpontúság. Közkeletű elképzelés, hogy a tudomány folyamatosan korrigálja saját fontosságunkról kialakult hamis képünket. Stephen Jay Gould azt mondta: „A legfontosabb tudományos forradalmaknak szinte egyetlen közös tulajdonsága az, hogy az emberi gőgöt egyik trónról a másik után taszítják le, és cáfolják meg addigi elképzelésünket, hogy központi szerepet játszanánk a kozmoszban.”^[769]

De mint kiderül, végül mégis központi szerepet játszunk. Az a képességünk, hogy modelleket – virtuális valóságokat – hozunk létre az agyunkban, szerénynek tűnő hüvelykujjunkkal párosulva elegendőnek bizonyult egy újfajta evolúciós forma, a technológia megjelenéséhez. Ez a fejlemény támogatta a biológiai evolúcióval kezdődő, egyre gyorsuló ütemű fejlődés fenntartását. És ez addig

így is marad, míg csak a kisujjunkban nem lesz az egész világegyetem.

Források és kapcsolat

Singularity.com

A könyvben tárgyalt különféle területeken egyre gyorsabban jelennek meg új fejlemények. A Singularity.com segíthet lépést tartani ezekkel. Az oldalon megtalálhatóak:

- A legújabb hírek
- A téma több ezer tételes hírarchívuma, 2001-től a KurzweilAI.net-ről (lásd lejjebb)
- Több száz cikk, kapcsolódó témákban a KurzweilAI.net-ről
- Kutatások linkjei
- Az összes függvény adata és forrása
- Anyag erről a könyvről
- Részletek ebből a könyvből
- Online jegyzetek

KurzweilAI.net

Szívesen látjuk az olvasókat a díjnyertes KurzweilAI.net honlapon is, ahol a száznál is több „nagy koponya” (akik közül jó néhányat idéztünk is a könyvben) több mint hatszáz cikke és több ezer hír mellett események listája és egyéb tartalom is található. Az elmúlt hat hónap során egymilliónál is több olvasónk volt. Ízelítő a KurzweilAI.net mémjeiből:

- A szingularitás
- Tudatra ébrednek a gépek?
- Örök élet, avagy hogyan építsünk agyat
- Virtuális valóságok
- Nanotechnológia
- Veszedelemes jövő
- A jövő látomásai
- Pont/ellenpont

Ingyenes (napi vagy heti) hírlevelünkre egyszerű feliratkozni: mindössze az e-mail címet kell beírni a KurzweilAI.net honlap egysoros űrlapjába. Az e-mail címeket senkivel sem osztjuk meg.

Fantastic-Voyage.net és RayandTerry.com

Aki szeretné már ma optimalizálni az egészségét, és maximalizálni az esélyét arra, hogy valóban megérje és tanúja lehessen a szingularitásnak, látogasson el a Fantastic-Voyage.net és a RayandTerry.com honlapokra! Terry Grossman orvossal, egészségügyi összeesküvő-társammal és a *Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever* (Fantasztikus utazás: élj olyan sokáig, hogy örökké élj!) társszerzőjével együtt fejlesztettem ezt a két honlapot. Bőséges információval szolgálhatnak arról, hogy miképpen fejleszthetjük mai tudásunkkal az egészségünket úgy, hogy mikorra a biotechnológia és a nanotechnológia forradalma beér, még jó egészségben és lelkiállapotban legyünk.

A szerző elérhetősége:

Ray Kurzweil a ray@singularity.com e-mail címen elérhető.

Függelék

Még egy pillantás a gyorsuló megtérülések törvényére

Az alábbi elemzés adja meg az alapját annak, hogyan foghatjuk fel az evolúciós változást hatványozottan exponenciális jelenségként (azaz olyan exponenciális növekedésnek, ahol az exponenciális növekedés mértéke, azaz az exponens maga is egy exponenciális függvény). Az alábbiakban a számítási kapacitás növekedését írom le, bár a képlete hasonlít a fejlődés egyéb aspektusaira, különösen az információalapú folyamatokra és technológiákra, beleértve a szoftveres intelligencia elsődleges forrásául szolgáló emberi intelligenciáról rendelkezésünkre álló tudást is.

Három változóval van dolgunk:

V : a számítás gyorsasága, azaz kapacitása (mértékegysége a számítás per másodperc per egységnyi költség)

W : a számítással foglalkozó szerkezetek tervezésére és építésére vonatkozó együttes tudás az egész világon

t : idő

Elsődleges analízisként megállapíthatjuk, hogy a számítógépek kapacitása a W lineáris függvénye. Azt is kijelenthetjük, hogy W kumulatív. Ezt arra a megfigyelésre alapozva tehetjük, hogy a releváns technológiai algoritmusok összeadódva felhalmozódnak. Az emberi agy esetében például az evolúciós pszichológusok azzal érvelnek, hogy ez az agy egy erőteljesen moduláris intelligenciarendszer, amely hosszú idő alatt fejlődött ki, fokozatos módon. Ebben az egyszerű modellben az azonnali tudásbeli növekedés arányos a számítási kapacitással. Ezek a megállapítások arra a következtetésre vezetnek, hogy a számítási kapacitás exponenciálisan növekszik az idővel.

Másképp fogalmazva, a számítási kapacitás lineáris függvénye a számítógépek építésére vonatkozó tudásnak. Ez valójában egy konzervatív megállapítás. Általánosságban az újítások valamilyen szorzófaktorral növelik a V -t, nem pedig additív mennyiséggel. A független újítások (melyek mindegyike a tudás lineáris növekedését jelenti) hatása összeszorozódik. Például egy olyan előrelépés az áramkörök esetében, mint a CMOS (komplementer fém-oxid félvezető), a hatékonyabb IC vezetékezési technológia, az olyan újítás, mint a futószalag elvű processzorok, vagy a gyors Fourier-transzformációhoz hasonló algoritmikus előrelépés mind önálló szorzófaktoroként növelik a V -t.

Mint láttuk, kiinduló megfigyeléseink az alábbiak:

A számítás gyorsasága arányos a világ tudásával:

$$(1) V = c_1 W$$

A világ tudásában beálló változás üteme arányos a számítás sebességével:

$$(2) \frac{dW}{dt} = c_2 V$$

Ha az (1)-et behelyettesítjük a (2)-be, az alábbiakat kapjuk:

$$(3) \frac{dW}{dt} = c_1 c_2 W$$

A megoldás pedig:

$$(4) W = W_0 e^{c_1 c_2 t},$$

azaz W exponenciálisan növekszik az idővel (az e a természetes logaritmus alapja).

Az általam gyűjtött adatok azt mutatják, hogy az exponenciális növekedés üteme (kitevője) is exponenciálisan növekszik (a XX. század elején háromévente kétszereztük meg a számítási kapacitást, a század közepén két évente, és most már évente megduplázzuk). A technológia exponenciálisan növekedő kapacitása a gazdaság exponenciális növekedésével jár. Ezt már a múlt századtól fogva megfigyelhetjük. Meglepő módon a recessziók, beleértve a nagy világválságot is, egy erre az exponenciális görbére rakódó viszonylag gyenge ciklusként modellezhetőek. A gazdaság minden esetben oda „ugrik vissza”, ahol akkor kellene lennie, ha a recesszió/válság meg sem történt volna. Az exponenciálisan növekedő technológiákhoz, például a számítástechnikai iparhoz kötődő területeken még gyorsabb exponenciális növekedés tapasztalható.

Ha figyelembe vesszük a számítási kapacitás erőforrásainak exponenciális növekedését is, megérthetjük, honnan ered a hatványozottan exponenciális növekedés.

Először tehát ismét azt mondjuk:

$$(5) V = c_1 W$$

De most figyelembe vesszük azt a tényt is, hogy N , azaz a számításra fordítható erőforrások is exponenciálisan növekednek:

$$(6) N = c_3 e^{c_4 t}$$

A világ tudásában beállt változás aránya ekkor arányos a számítási sebesség és a számításra fordítható erőforrások szorzatával:

$$(7) \frac{dW}{dt} = c_2 NV$$

Ha behelyettesítjük (5)-öt és (6)-ot a (7) képletbe, az alábbi látjuk:

$$(8) \frac{dW}{dt} = c_1 c_2 c_3 e^{c_4 t} W$$

Ennek megoldása:

$$(9) W = W_0 \exp\left(\frac{c_1 c_2 c_3 c}{c_4} e^{c_4 t}\right),$$

azaz a világ tudása hatványozottan exponenciális ütemben növekszik.

Vegyük most pár valós adatot. A harmadik fejezetben az összes agyi terület funkcionális szimulációjának követelményei alapján körülbelül 10^{16} számítás per másodpercre becsültem az emberi agy számítási képességét. Hogy minden egyes neuron és neuronok közti kapcsolat nonlinearitását szimuláljuk, ahhoz ennél is magasabb szintű számítás kellene: 10^{11} neuron,

megszorozva a neuronokként átlagos 10^3 kapcsolattal (amennyiben a számítások elsődlegesen a kapcsolódásokban zajlanak le), megszorozva a 10^2 tranzakció per másodperccel és 10^3 számítás per tranzakcióval – az eredmény nagyjából 10^{19} lenne. Az alábbi számolásban a funkcionális szimuláció szintjét (10^{16} számítás per másodperc) veszem figyelembe.

Ha beleszámítjuk az exponenciálisan növekedő gazdaságot, különösen a számításra fordítható erőforrásokat (ami már most nagyjából évi egybillió dollár), azt látjuk, hogy a nem biológiai intelligencia már a század dereka előtt több milliárdszor erősebb lesz a biológiai intelligenciánál.

Harmadik analízis

A XX. században létező, számítással foglalkozó eszközök és számítógépek alapján:

Legyen $S = \text{CPS}/1000\$$: vagyis az 1000 dollárért kapható számítás per másodperc

A XX. századból megfelelő adatok behelyettesítve:

$$S=10 \left[6.00 \times \left(\frac{20.40}{6.00} \right)^{\left[\frac{\text{év}-1900}{100} \right]} - 11.00 \right]$$

Meghatározhatjuk a növekedés ütemét, G -t, egy adott időszak alatt:

$$G=10 \left(\frac{\log(S_c) - \log(S_p)}{Y_c - Y_p} \right)$$

ahol S_c : számítás per másodperc/1000 \$ a jelen évre, S_p : számítás per másodperc /1000 \$ az előző évre, Y_c : jelen év, Y_p : az előző év.

Az emberi agy: 10^{16} számítás per másodperc.

Az emberi faj: 10 milliárd (10^{10}) emberi agy = 10^{26} számítás per másodperc.

Nagyjából 2023-ra fogjuk elérni, hogy 1000 dollárra egy emberi agy kapacitása (10^{16} számítás per másodperc) jut.

Nagyjából 2037-re fogjuk elérni, hogy egy centre egy emberi agy kapacitása (10^{16} számítás per másodperc) jut.

Nagyjából 2049-re fogjuk elérni, hogy 1000 dollárra az emberi faj kapacitása (10^{26} számítás per másodperc) jut.

De másféleképp is levezethetjük a hatványozottan exponenciális növekedést. Mint korábban megjegyeztem, a tudás növekedésének üteme (dW/dt) legalábbis arányos a tudás mértékével minden adott időpontban. Ez egyértelműen konzervatív megállapítás, ha figyelembe vesszük, hogy az újítások (a tudásbeli előrelépések) hatása erre az ütemre inkább összeszoródik, mint összeadódik. De ha exponenciális növekedési rátát veszünk figyelembe:

$$(10) \frac{dW}{dt} = C^w,$$

ahol $C > 1$, a megoldás:

$$(11) W = \frac{1}{\ln C} \ln \left(\frac{1}{1 - t \ln C} \right),$$

ahol lassú algoritmikus növekedést láthatunk, ameddig $t < 1/\ln C$, de a $t = 1/\ln C$ szingularitáshoz közel hirtelen kirobban.

Még a szerény $dW/dt = W^2$ vége is szingularitás.

Valójában minden képlet, amelyben a növekedés hatványfüggvényt követ, azaz

$$(12) \frac{dW}{dt} = W^a,$$

ahol $a > 1$, szingularitással rendelkező megoldást eredményez:

$$(13) W = W_0 \frac{1}{(T - t)^{\frac{1}{a-1}}},$$

mely a T időpontban következik be. Minél nagyobb a értéke, annál közelebb van a szingularitás.

Véleményem szerint nehéz elképzelni a végtelen tudást, véges anyagi és energetikai erőforrások mellett, ám az eddig látott trendek illenek a hatványozottan exponenciális folyamatba. Úgy tűnik, hogy az extra faktor (W -re) a $W \times \log(W)$ formát veszi fel. Ez a kifejezés a hálózati hatást írja le. Ha létezik az internethez hasonló hálózatunk, meggyőzően megmutatható, hogy annak hatása vagy haszna arányos az $n \times \log(n)$ értékkel, ahol n a nódusok, csomópontok száma. Minden csomópont (vagy felhasználó) részesül belőle, ezért szorozzuk meg n -nel. Minden felhasználó (csomópont) számára a hálózat haszna $= \log(n)$. Bob Metcalfe (az Ethernet feltalálója) egy n csomópontú hálózat hasznát $= c \times n^2$ -re becsülte, de ez túlzás. Ha az internet mérete megnövekszik, növekszik számomra az értéke, de nem duplázódik meg. Ésszerű becslések alapján az egyes felhasználók számára a hálózat méretének logaritmusával arányos a hálózat értéke. Így a hálózat értéke vagy haszna összesítve arányos az $n \times \log(n)$ -nel.

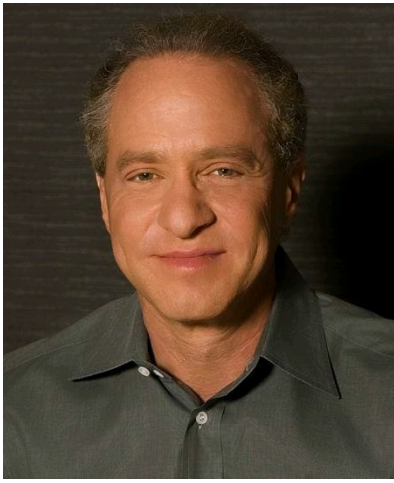
Amennyiben a növekedés üteménél inkább a logaritmikus hálózati hatást vesszük figyelembe, a változás ütemére a következőt kapjuk:

$$(14) \frac{dW}{dt} = W + W \ln W$$

Ennek a megoldása egy hatványozott exponenciális, amit korábban az adatokban is láttunk:

$$(15) \quad W = \exp(e^t)$$

A szerzőről



Ray Kurzweil egyike a világ vezető feltalálójának, gondolkodójának és jövőkutatójának, aki immár húsz éve szolgál pontos előrejelzésekkel. Kutatási területei a zeneszintézisre, a beszéd- és arcfelismerésre, olvasástechnológiára és virtuális valóságokra terjednek ki. Több tiszteletbeli doktori címmel és számos díjjal jutalmazták, többek között a MIT-Lemelson-díjjal. Honlapját, a Kurzweilai.net-et milliónál is több olvasó követi, és jelenleg ő a Google fejlesztési igazgatója.

Kedves Olvasó!

Az Ad Astra kiadó megalapítását az az elhatározás szülte, hogy a kortárs nemzetközi fantasztikus irodalom kiemelkedő és friss szemléletű műveiből sokszínű válogatást nyújtson. Célunk, hogy felkutassuk és igényes formában, magyar nyelven megjelentessük azokat a regényeket és novellákat, amelyek a nemzetközi fantasztikus irodalmat formálják és megújítják, érdekes témákat vetnek fel, és látásmódjukban vagy stílusukban egyediek és különlegesek. Szerzőink között olyan nevek szerepelnek, mint a többszörös díjnyertes Paolo Bacigalupi, Catherynne M. Valente, Vernor Vinge, Ian McDonald és Lauren Beukes.

Az Ad Astra a hagyományos könyvkiadás mellett a kezdetektől szerepet kívánt vállalni az e-könyvkiadásban is, hiszen mindegy, hagyományos vagy elektronikus formában olvas az ember, a gondolatok, hangulatok, szavak ugyanazok. Fontosnak tartjuk, hogy Ön bárhol, bármilyen készüléken olvashassa könyveinket, ezért a „kemény” másolásvédelem helyett a felhasználást nem akadályozó vízjelvezést választottuk. Példányát Ön szabadon átmásolhatja számítógépére, e-könyv olvasójára, okostelefonjára, hogy bárhová magával vihesse, s amennyiben webboltunkon keresztül vásárolt, virtuális könyvespolcán mindig a legfrissebb verziószámú, javított másolatot érheti el.

Mivel minden egyes megvásárolt példány egyedi vízjellel rendelkezik, kérjük, vigyázzon, más ne élhessen vissza vele! Amennyiben szeretné megosztani másokkal is a könyvet, adja kölcsön körültekintően, és ha a kiadványunk elnyerte tetszését, meséljen róla, terjessze a hírét, hogy megtalálhassák az olvasói, akiknek íródott.

S amennyiben Ön máshonnan, barátától, ismerőstől, netán letöltő- vagy fájlcsere-lő oldalról jutott hozzá az e-könyvhöz, kérjük, ne terjessze tovább – ám, ha elnyerte tetszését a könyv, látogasson el a webboltunkba, és egy legális példány megvásárlásával járuljon hozzá, hogy minél több hasonló kiadványt adhassunk ki a jövőben!

Hálásan köszönünk minden visszajelzést, segítő szándékú kritikát és ötletet, amelyeket megfontolva még többet tehetünk azért, hogy Ön, az Olvasónk elégedett legyen kiadónkkal és könyveinkkel.

Köszönjük, hogy a mi könyvünket választotta, és reméljük, örömet talált az olvasásában!

Tisztelettel,
Kleinheincz Csilla
szerkesztő

www.adastrakiado.hu
szerkesztoseg@adastrakiado.hu

Az Ad Astra Kiadó e-könyvei

Catherynne M. Valente: [Marija Morevna és a Halhatatlan](#)

Lauren Beukes: [Zoo City](#)

Lavie Tidhar: [Oszama](#)

Lavie Tidhar: [Utazásaim az al-Kaidával](#)

Paolo Bacigalupi: [A felhúzzhatós lány](#)

Scott Westerfeld: [Leviatán](#)

Scott Westerfeld: [Behemót](#)

Vernor Vinge: [Tűz lobban a mélyben](#)

Greg Egan: [Diaszpóra](#)

Jane Rogers: [Jessie Lamb testamentuma](#)

Lőrinczy Judit: [Ingókövek – Sztálingrád másik csatája](#)

-

Paolo Bacigalupi: [Hajóbontók](#)

Kleinheincz Csilla (szerk.): [10 - SFmag fantasztikus irodalmi antológia](#)

Jegyzetek

{1} Néhány Tom Swift-kötet (*A fekete sárkány*, *Negatív zóna*, *A karatézó kiborg*) magyarul is megjelent az 1990-es évek elején a Szy-Szy és a Pult kiadók jóvoltából. Ezek a negyedik sorozat eredetileg 1991-ben megjelent kötetei. Tom Swift pályafutása már az 1910-es években elkezdődött, a szerző által említett címek a második sorozathoz tartoznak. További információkért lásd: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Tom_Swift_books. (*A ford.*)

{2} FDA: *Food and Drug Administration*: az Egyesült Államok Élelmiszer- és Gyógyszerhatósága. (*A ford.*)

{3} Az összetett struktúrákat alkotó nanogépezetek, a *fogletek* elnevezésének a töve az angol *fog*, „köd” szó. (*A ford.*)

{4} Az első Blue Gene/P szuperszámítógép, a JuGENE, amelyet 2007 november 12-én helyeztek üzembe, 167 teraflopos teljesítményt nyújtott. (*A szerk.*)

{5} * Federal Reserve System; az USA központi banki rendszere. (*A szerk.*)

{6} Az első Blue Gene/P szuperszámítógép, a JuGENE, amelyet 2007 november 12-én helyeztek üzembe, 167 terafl opos teljesítményt nyújtott. (*A szerk.*)

{7} Az ilyen irányú hipotézisek a könyv megírása óta nem nyertek alátámasztást. (*A lektor*)

{8} A könyv megírása óta cetfélék és elefántok agyában is felfedeztek ilyen sejteket. (*A lektor*)

{9} 2012-ben már 125 mikroszekundumos MD- (molekuladinamikai) –szimulációkat is sikerült előállítani. (*A szerk.*)

{10} Idézet Arthur C. Clarke-tól (*A lektor*)

{11} A rendszer jelenleg is tesztelés alatt áll, a becslések szerint várhatóan két-három éven belül kerülhet piacra. (*A szerk.*)

{12} A későbbiekben sem az eredeti, sem a hangalapú hidegfűzés eredményeket nem sikerült kísérletileg reprodukálni. (*A lektor*)

{13} Az OpenCyc 4.0. verzióját 2012 júniusában bocsátották útjára, ennek tudásbázisa 239 000 fogalomra és 2 093 000 tényre terjed ki. (*A lektor*)

{14} 2013-ban már a világon több mint ötven ország alkalmaz drónokat; az Obama-adminisztráció – amellet, hogy mintegy kilencvenezer fővel csökkentené az USA haderejének létszámát – legalább 30%-kal meg kívánja növelni jelenleg is több ezresre becsült drónflottáját. (*A szerk.*)

{15} Jelenleg több cég (Ford, Lexus, Chrysler, Honda és GM) is kínál olyan autókat, amelyek képesek hangfelismerésre. (*A lektor*)

{16} Ezek közül 2007-ben negyvenkettőt üzembe helyeztek. (*A lektor*)

{17} Valójában német anyanyelvű volt, csak az akkor az Osztrák–Magyar Monarchiához tartozó Brünmben született. (*A szerk.*)

{18} A XVIII. században alakult politikai háttérszervezet az Egyesült Államokban, amely a keleti parton egészen a nagy gazdasági világválságig megőrizte a befolyását. (*A szerk.*)

{1} Anyám tehetséges festő, a vízfestményekre specializálta magát. Apám elismert zenész volt, a Bell Szimfonikus Zenekar karmestere, a Queensborough College Zeneművészeti Tanszékének alapítója és egykori igazgatója.

{2} A Tom Swift Jr. sorozatot 1954-ben kezdte el a Grosset & Dunlap kiadó. Több szerző írta a Victor Appleton álnév alatt, és egészen 1971-ig tartott. A tizenéves Tom Swift és barátja, Bud Barclay bejárta a világegyetemet, különös helyeket fedezett fel, legyőzte a rosszfűkat, és egzotikus kütyüket, például ház nagyságú űrhajót, űrállomást, repülő laboratóriumot, lebegő repülő, elektromos víz alatti légzőkészüléket, tengeralattjáró-koptert és repellatront (ami taszította a dolgokat, így a víz alatt például a vizet, buborékot hozva létre, amiben a fiúk életben maradhattak) használt.

A sorozat első kilenc könyve: *Tom Swift and His Flying Lab* (1954), *Tom Swift and His Jetmarine* (1954), *Tom Swift and His Rocket Ship* (1954), *Tom Swift and His Giant Robot* (1954), *Tom Swift and His Atomic Earth Blaster* (1954), *Tom Swift and His Outpost in Space* (1955), *Tom Swift and His Diving Seacopter* (1956), *Tom Swift in the Caves of Nuclear Fire* (1956) és *Tom Swift on the Phantom Satellite* (1956).

{3} A program a „Select” nevet kapta. A diákok kitöltötték egy háromszáz kérdésből álló kérdőívet. A szoftver, amely egy körülbelül kétmillió adatot tartalmazó, háromezer egyetemet felölelő adatbázist használt, kiválasztott hat-tizenöt iskolát, amelyik illett a diákok érdeklődési köréhez, háttéréhez és tanulmányi eredményeihez. Mi magunk körülbelül tízezer diák adatait dolgoztuk fel, majd eladtuk a programot a Harcourt, Brace & World kiadvállalatnak.

{4} A *The Age of Intelligent Machines*-t (MIT Press, 1990) az Amerikai Kiadók Szövetsége az év legjobb számítástechnikai könyvének választotta. A kötet áttekinti a mesterséges intelligencia fejlesztését, és előrejelzi az intelligens gépek számos filozófiai, társadalmi és gazdasági hatását. A főszöveget tizenhárom, a mesterséges intelligenciáról szóló cikk egészíti ki, olyan gondolkodóktól, mint Sherry Turkle, Douglas Hofstadter, Marvin Minsky, Seymour Papert és George Glider. A könyv teljes szövege elolvasható a <http://www.KurzweilAI.net/ebooks/the-age-of-intelligent-machines> címen.

[\[5\]](#) A képességek kulcsfontosságú mértékei (például az ár–teljesítmény-arány, a sávszélesség és a kapacitás) négyzetesen növekszenek (azaz adott időegység alatt megsokszorozódnak), nem pedig lineárisan.

[\[6\]](#) Douglas R. Hofstadter: Gödel, Escher, Bach: Egybefont gondolatok birodalma (Typotex, 2000).

[\[7\]](#) A Transtopia oldal (<http://transtopia.org/faq.html#1.11>) szerint a „szingularitáriánus” szó „Mark Plus eredeti definíciójában (1991) azt jelenti, hogy »aki hisz a szingularitás fogalmában.«” A kifejezés másik definíciója szerint: „»a szingularitás aktivistája« vagy »a szingularitás barátja«; azaz valaki, aki annak érdekében tevékenykedik, hogy bekövetkezzen egy szingularitás” (Eliezer S. Yudkowsky: Singularitarian Principles; Szingularitáriánus alapelvek). A definíciót illetően nincs általános egyetértés, és sok transzhumanista még mindig a szó eredeti értelmében szingularitáriánus – azaz „hisz a szingularitás fogalmában”, de nem „aktivista” vagy „barát”.

Eliezer S. Yudkowsky (2000) egy másik definíciót javasol: „szingularitáriánus az, aki hisz abban, hogy kíváncsi technológiai úton létrehozni az emberinél fejlettebb intelligenciát, és aki tesz is ennek eléréséért. A szingularitáriánus a szingularitásként ismert jövő barátja, hirdetője, védelmezője és ügynöke.” Eliezer S. Yudkowsky: *The Singularitarian Principles*. (1.0.2 verzió, 2000. január 1.) <http://yudkowsky.net/sing/principles.ext.html>

Szerintem a szingularitást sokféleképpen, az emberi diskurzus sok szférájában elő lehet mozdítani, és sokat lehet tenni azért, hogy minél inkább a tudás konstruktív fejlődését képviselje – például a demokrácia hirdetésével, a totalitáriánus és fundamentalista nézetrendszerek és ideológiák elleni küzdelemmel és tudás teremtésével, annak számtalan különféle alakjában: zenével, művészettel, irodalommal, tudománnyal és technológiával. Én azt tartom szingularitáriánusnak, aki megérti az ebben az évszázadban bekövetkező változásokat, és aki elgondolkodott azon, milyen következményekkel járnak ezek a saját életére nézve.

[\[8\]](#) A számítási kapacitás megduplázódását a következő fejezetben fogjuk megvizsgálni. Noha az egységre jutó tranzisztorok száma két évente megkétszereződött, a tranzisztorok egyre gyorsabbak lettek, és sok más szinten is történtek újítások és fejlesztések. Az egységre jutó számítási teljesítmény a közelmúltban évente megduplázódott, az 1990-es évek során pedig minden évben megkétszereződött az a számítási mennyiség (a másodpercenként elvégzett műveletek számát tekintve), amit a számítógépes sakkozógépek fel tudtak mutatni.

[\[9\]](#) Neumann János, idézi Stanislaw Ulam. (Tribute to John von Neumann; Tiszteletadás Neumann Jánosnak, Bulletin of the American Mathematical Society 64.3, 2. rész, 1958. május, 1–49. o.) Neumann János (1903–1957) Budapesten született, zsidó bankár családban, és az 1930-as években kezdett el matematikát tanítani a Princeton Egyetemen. 1933-ban egyike lett a princeton-i Institute of Advanced Studies első hat professzorának, és egészen élete végéig ott is maradt. Érdeklődési köre igen tág volt: meghatározó szerepet játszott a kvantummechanika új tudományterületének kialakításában; Oskar Morgensternnel megírta a Theory of Games and Economic Behavior (Játékelmélet és gazdasági viselkedés), amely átalakította a közgazdaságtant; továbbá kivette részét az első számítógépek logikai megtervezéséből, illetve az 1930-as évek végén részt vett a MANIAC (Mathematical Analyzer, Numeral Integrator, and Computer – matematikai elemző, numerikus integrátor és számítógép) megépítésében.

Oskar Morgenstern így írt Neumannról nekrológiájában: „Neumann szokatlanul nagy hatással volt a vele személyes kapcsolatban állók gondolkodására... Döbbenetes tudása, azonnali válaszai, páratlan intuíciója ámulatba ejtette ismerőseit. Gyakran már azelőtt megoldotta a problémáikat, hogy egyáltalán megfogalmazták volna őket. Az elméje olyan különleges volt, hogy egyesekben – szintén kiváló tudósokban – felmerült a kérdés, vajon nem az ember szellemi fejlődésének egy új szakaszát képviseli-e.” Oskar Morgenstern: Obituary. John von Neumann, 1903–1957. *Economic Journal*, 1958. március. 170–174 o.

[\[10\]](#) Lásd a [\[68\]](#) és [\[69\]](#) jegyzeteket a második fejezetben

[\[11\]](#) A konferenciára 2003. február 19–21. között került sor a kaliforniai Monterey-ben. Az érintett témák között szerepelt az őssejt-kutatás, a biotechnológia, a nanotechnológia, a klónozás és a genetikailag módosított élelmiszerek. A konferencia előadói által ajánlott könyvek listája megtalálható a <http://www.thefutureoflife.com/books.htm> címen.

[\[12\]](#) Az internet a csomópontok (szerverek) számát tekintve az 1980-as években minden évben a kétszeresére nőtt, de 1985-ben még csak néhány tízezer csomópont létezett. Ez a szám 1995-re több tízmillióra növekedett. 2003 januárjában az Internet Software Consortium (<http://www.isc.org/ds/host-count-history.html>) százhetvenkétfélmillió gazdagépet, azaz weboldalnak helyet adó szervert számolt meg – és ez a szám csak részhalma az összes csomópontnak.

[\[13\]](#) A legtágabb értelmében az antropikus elv azt mondja ki, hogy a fizika alapvető állandóinak kompatibilisnek kell lenniük a létezésünkkel, mert ha nem lennének azok, akkor nem lehetnénk itt, hogy megfigyeljük őket. Az elv továbbfejlesztésének egyik katalizátora az állandók, például a gravitációs állandó és a finomszerkezeti állandó tanulmányozása. Ha ezeknek az állandóknak az értéke kívül esne egy bizonyos nagyon keskeny sávon, akkor nem lenne lehetséges az intelligens élet a világegyetemünkben. Például ha a finomszerkezeti állandó nagyobb lenne, nehezen jöhetne létre kémiai kötés az atomok között. Ha kisebb lenne, az atomok elektronjai nem maradnának meg a pályájukon. Más szóval, ha csak ez az egyetlen állandó kívül esne egy rendkívül szűk sávon, akkor nem jönnének létre molekulák. Az antropikus elmélet hívei számára tehát úgy tűnik, hogy a világegyetemünk az intelligens élet kialakulására van finomhangolva. (Az elmélet vitatói, például Victor Stenger azzal érvelnek, hogy ez a finomhangolás tulajdonképpen nem is olyan finom; léteznek kiegyenlítő mechanizmusok, melyek tágabb keretet biztosítanak arra, hogy eltérő körülmények között létrejöjjön az élet.)

Az antropikus elv felbukkan azokban az új kozmológiai elméletekben is, melyek számos, a saját egyedi törvényeikkel rendelkező

világegyetem létezését posztulálják (lásd a [\[14\]](#) és [\[15\]](#) jegyzeteket). Csak abban a világegyetemben lehetünk itt és tehetjük fel ezeket a kérdéseket, amelynek a törvényei lehetővé teszik a gondolkodó lények létezését.

A vitára nagy hatással volt John Barrow és Frank Tipler *Az antropikus kozmológiai elv* című könyve. (Barrow, John – Tipler, Frank: *The Anthropic Cosmological Principle*. New York, 1988, Oxford University Press.) Lásd még Steven Weinberg *A Designer Universe?* („Megtervezett világegyetem?”) című írását a http://www.physlink.com/Education/essay_weinberg.cfm címen.

[\[14\]](#) Egyes kozmológiai elméletek szerint nem egy Nagy Bumm volt, hanem sok, amelyekből több világegyetem keletkezett (párhuzamos multiverzumok vagy „buborékok”). A különböző buborékokban más és más fizikai állandók és erők érvényesek; némelyikben (vagy legalábbis egyben) a körülmények támogatják a szénalapú életet. Lásd Max Tegmark: *Parallel Universes*. („Párhuzamos világegyetek”) *Scientific American*, 2003. május, 41–53. o.; Martin Rees: *Exploring Our Universe and Others*. („Világegyetemünk és más világegyetek felfedezése”) *Scientific American*, 1999. december, 78–83. o.; Andrei Linde: *The Self-Reproducing Inflationary Universe*. („Az önreprodukáló inflációs világegyetem”) *Scientific American*, 1994. november, 48–55. o.

[\[15\]](#) A „sokvilág” vagy multiverzum-elméletet mint a kvantummechanika egyik értelmezését egy kvantummechanikai probléma megoldásához fejlesztették ki, majd kombinálták az antropikus elvvel. Ahogyan Quentin Smith összefoglalja:

„A kvantummechanika hagyományos vagy koppenhágai értelmezéséhez kapcsolódó komoly probléma az, hogy nem lehet alkalmazni egy zárt világegyetem általános relativitáselméleti téridő-geometriájára. Egy ilyen világegyetem kvantumállapota az állapottérben változó amplitúdójú hullámfüggvényként írható le; annak a valószínűsége, hogy a világegyetemet valamilyen adott állapotban találják, a hullámfüggvény adott állapothoz tartozó amplitúdójának négyzete. Ahhoz, hogy a világegyetem átkerüljön a különböző valószínűségű állapotok szuperpozíciójából valamelyik konkrét állapotba – abba, amelyikben valójában van –, fel kell vonultatni egy mérési apparátust, amely összeomlasztja a hullámfüggvényt, így a világegyetem egy adott, határozott állapotba kerül. Ez azonban lehetetlen, mivel a világegyetemen kívül nincs semmi, nincs külső mérési apparátus, ami össze tudná omlasztani a hullámfüggvényt.

Az egyik lehetséges megoldás az, hogy kialakítjuk a kvantummechanikának azt az értelmezését, amely nem a koppenhágai értelmezés központi elemét jelentő külső megfigyelés vagy mérés fogalmára támaszkodik. Megfogalmazható egy zárt rendszeren belüli kvantummechanika.”

Egy ilyen értelmezést fejlesztett ki Hugh Everett 1957-es *Relative State Formulation of Quantum Mechanics* („A kvantummechanika megfogalmazása relatív állapotokkal”) című cikkében. A hullámfüggvény által képviselt szuperpozíció minden állapotát úgy fogja fel, mint ami tartalmazza a megfigyelő (vagy mérési apparátus) egyik állapotát és a megfigyelt rendszer egyik állapotát. Így „az egymást követő megfigyelések (avagy kölcsönhatások) során minden alkalommal különböző állapotokba »ágazik el« a világ. Mindegyik ág a mérés egy lehetséges kimenetelét, illetve a megfigyelt rendszer egy megfelelő saját állapotát képviseli. Bármely adott megfigyeléssorozatot követően az összes ág egymás mellett létezik.”

Kauzálisan mindegyik ág független az összes többitől, ezért egyetlen megfigyelőnek sem lesz tudomása az „elágazásról”. A világ minden megfigyelő számára pont olyan lesz, mint amilyenek ténylegesen látja.

A világegyetem egészére alkalmazva ez azt jelenti, hogy az egyes részek közötti mérés jellegű kölcsönhatások következtében a világegyetem szinte folyamatosan különböző, egymástól kauzálisan független ágakra válik szét. Mindegyik ág egy-egy külön világnak tekinthető, melyek mindegyike folyamatosan újabb világokra válik szét.

Mivel ezek között az ágak (azaz a világegyetek) között az életre alkalmasak és alkalmatlanok is lesznek, Smith így folytatja: „Ezen a ponton meg lehet fogalmazni, hogyan használható fel az erős antropikus elv a kvantummechanika sokvilág-értelmezésével kombinálva arra, hogy megpróbáljuk megoldani a szöveg elején említett látszólagos problémát. Kiderül, hogy a látszólag nehezen magyarázható tény, mely szerint a tényleges világunk sok-sok élettelen világ helyett pont egy intelligens élettel rendelkező világ, nos, nem is állja meg a helyét. Ha az élő és élettelen világok mind egyaránt valóságosak, akkor saját világunk létezése nem meglepő, hanem éppen hogy várható.”

Quentin Smith: *The Anthropic Principle and Many-Worlds Cosmologies*. („Az antropikus elv és a sokvilág-kozmológiák) *Australasian Journal of Philosophy*, 63.3, 1985. szeptember.

[\[16\]](#) Az agy önszervező elveit, illetve ennek a működési elvnek és a mintázatfelismerésnek a kapcsolatát illetően lásd a negyedik fejezetet.

[\[17\]](#) A „lineáris” skálán (ahol az osztások egyenlő értéktartományt fognak át) a könyv nyújtotta szűkös hely miatt lehetetlen lenne az összes adatot (például az évmilliárdokat) ábrázolni. A logaritmikus skála megoldja ezt a problémát azzal, hogy nem az aktuális értékeket, hanem azok nagyságrendjét ábrázolja, így az adatok szélesebb tartományát képes reprezentálni.

[\[18\]](#) Theodore Modis, a monterrey-i (Mexikó) DUXX Felsőfokú Üzletvezetési Iskola professzora megpróbált megfogalmazni egy „pontos matematikai törvényt, amely a világegyetem változásainak és összetettségének a változását írja le”. Ezen változások mintázatának és történetének a kutatásához a szignifikáns események – ahol az események nagy változásnak felelnek meg – analitikus adathalmazára volt szüksége. Hogy elkerülje a részrehajlást, nem akart kizárólag a saját listájára támaszkodni. Ehelyett tizenhárom, egymástól független listát állított össze a biológia és a technológia történetének kiemelkedő eseményeiről, a következő források használatával:

- Carl Sagan: *Az Éden sárkányai: Tűnődések az emberi intelligencia evolúciójáról*. Ford. Szilágyi Tibor. Budapest, 1990, Európa. A pontos adatok Modis közlései.

- Amerikai Természettudományi Múzeum. A pontos adatok Modis közlései.
- Az *Encyclopaedia Britannica* „az élet történetének fontos eseményei” táblázata.
- Educational Resources in Astronomy and Planetary Science (ERAPS) (Csillagászati és bolygótudományi oktatási forrásanyagok), University of Arizona.
- Paul D. Byer Nobel-díjas (1997) biokémikus magánközlése. A pontos adatok Modis közlései.
- J. D. Barrow és J. Silk: The Structure of the Early Universe. („A korai világegyetem felépítése”) *Scientific American* 242.4, 1980. április, 118–128. o.
- J. Heidmann (Observatoire de Paris): *Cosmic Odyssey. (Kozmikus odüsszeia)* Angol ford. Simon Mitton. Cambridge, 1989, Cambridge University Press.
- J. W. Schopf, szerk.: *Major Events in the History of Life. Symposium convened by the IGPP Center for the Study of Evolution and the Origin of Life. (Az élet történetének kiemelkedő eseményei. Az IGPP Center for the Study of Evolution and the Origin of Life szimpóziuma)* Boston, 1991, Jones & Bartlett.
- Phillip Tobias: Major Events in the History of Mankind. („Az emberiség történetének kiemelkedő eseményei”) In Schopf *Major Events in the History of Life*, 6. fejezet.
- David Nelson: *Lecture on Molecular Evolution I.* („Előadás a molekuláris evolúcióról I.”), <http://drnelson.utmem.edu/evolution.html>; valamint uő: *Lecture Notes for Evolution II.* („Evolúció II előadásjegyzetek”) <http://drnelson.utmem.edu/evolution2.html>.

• G. Burenhult, szerk.: *Az első emberek. Az ember származása és őstörténete.* Budapest, 1995, Officina Nova.

• D. Johanson és B. Edgar: *From Lucy to Language. (Lucytól a nyelvig)* New York, 1996, Simon & Schuster.

• R. Coren: *The Evolutionary Trajectory: The Growth of Information in the History and Future of Earth. (Az evolúció pályája: Az információ növekedése a Föld története és jövője során)* World Futures General Evolution Studies sorozat. Amsterdam, 1998, Gordon & Breach.

Ezek a listák az 1980-as és 1990-es évekből származnak. A többségük lefedi a világegyetem ismert történetét, három pedig az emberszármazás evolúciójának szűkebb korszakára koncentrál. Néhány régebbi lista dátumai pontatlanok, de elsősorban maguk az események és a történelemben való viszonylagos elhelyezkedésük az érdekes.

Modis ezután egyesítette a listákat, hogy megkeresse a fontos események csoportjait, az ő „kanonikus mérföldköveit”. A listán szereplő 203 kiemelkedő eseményből így 28 kanonikus mérföldkő emelkedett ki. Modis emellett felhasználta Coren önálló listáját a módszere ellenőrzésére. Lásd T. Modis: Forecasting the Growth of Complexity and Change. („A komplexitás és a változás növekedésének előrejelzése”) *Technological Forecasting and Social Chang*, 69.4, 2002. <http://www.growth-dynamics.com/articles/TedWEB.htm>

[19] Modis megjegyzi, hogy hibák fordulhatnak elő a listák eltérő hossza és az eseményekhez rendelt dátumok eltérései miatt (lásd T. Modis: The Limits of Complexity and Change. („A komplexitás és változás korlátai”) *The Futurist*, 2003. május–június. <http://www.growth-dynamics.com/articles/futurist.pdf>. Ezért a dátumcsoportokat használta fel a kanonikus mérföldkövei meghatározásához. Az egyes mérföldkövek egy-egy átlagot jelképeznek, az eltérések jelentette hibát a szórásnak tulajdonítja. Az olyan események esetében, amelyekhez csak egy forrása volt, a hibát önkényesen az átlagos hibával megegyezőnek tekintette. Modis egyéb, a szóráson kívüli hibaforrásokra is rámutat – olyan esetekre, amelyek pontos dátuma ismeretlen, vagy ahol lehet, hogy tévesen tulajdonít egyenlő fontosságot minden adatpontnak.

Figyeljük meg, hogy Modis dátuma a dinoszauruszok kihalására (54,6 millió évvel ezelőtt) nem elég távoli!

[20] Az idegsejtek közötti átlagos ingerületátviteli idő nagyságrendileg öt milliszekundum, ami másodpercenként kétszáz digitális vezérlésű analóg tranzakciót tesz lehetővé. Még ha számításba is vesszük az idegsejtek információfeldolgozásának nem lineáris voltát, ez nagyságrendileg egymilliószor lassabb, mint a jelenlegi elektronikus áramkörök, melyek kapcsolási ideje kevesebb mint egy nanoszekundum (lásd a számítási kapacitás elemzését a második fejezetben).

[21] Los Alamos National Laboratory kutatóinak új elemzése a radioaktív izotópok relatív koncentrációjáról a világ egyetlen ismert természetileg létrejött nukleáris reaktorában (Nyugat-Afrikában, a gaboni Oklóban) azt mutatta ki, hogy több mint kétmilliárd év alatt csökkenés következett be az *alfa* finomszerkezeti állandóban (a fénysebesség alfával fordítottan arányos). Ez azt jelenti, hogy a fény sebessége valamelyest megnövekedett, bár ezt a megállapítást nyilván még alá kell támasztani. Lásd: Speed of Light May Have Changed Recently. („A fénysebesség megváltozott a közelmúltban”) *New Scientist*, 2004. június 3. 0. , <http://www.newscientist.com/article/dn6092-speed-of-light-may-have-changed-recently.html>. Lásd még <http://www.sciencedaily.com/releases/2005/05/050512120842.htm>.

[22] Stephen Hawking 2004. június 21-én, Dublinban egy tudományos konferencián leszögezte, hogy tévedett egy sokat vitatott, harminc évvel ezelőtti kijelentésében, amit a fekete lyukakról tett. Akkor azt állította, ha valamit elnyel egy fekete lyuk, akkor arról soha többé nem lehet információt szerezni. Ez azonban ellentmondana a kvantumelméletnek, ami szerint az információ nem vész el. „Sajnálom, hogy ki kell ábrándítanom a sci-fi rajongókat, de ha az információ nem vész el, akkor nem lehetséges a fekete lyukakon át más világegyetemekbe utazni – mondta. – Ha valaki beleugrik egy fekete lyukba, akkor a tömegenergiája vissza fog kerülni a mi

világegyetemünkbe, de összekavarodva. Tartalmazni fogja az információt, hogy milyen volt az illető, de felismerhetetlen állapotban.” Lásd Dennis Overbye: *About Those Fearsome Black Holes? Never Mind.* („Hogy mi van azokkal a félelmetes fekete lyukakkal? Semmi gond”) *New York Times*, 2004. július 22.

[23] Az eseményhorizont a szingularitást (a fekete lyuk végtelen sűrűségű és végtelen nyomás alatt álló középpontját) körülvevő, gömbszerű térrész külső felülete vagy határa. Az eseményhorizonton belül olyan erős a gravitáció, hogy azt még a fény sem képes elhagyni (bár a részecske-antirészecske párok létrejöttét kiváltó kvantumhatások miatt a felszín sugárzást bocsáthat ki, mivel ha a pár egyik tagja a fekete lyukba kerül, a másik sugárzás formájában távozik – ez az úgynevezett Hawking-sugárzás). Ezért nevezik ezeket a régiókat „fekete lyukaknak”, mely elnevezést John Wheeler fizikus találta ki. Noha a fekete lyukak létezését legelőször Kurt Schwarzschild német asztrofizikus vetette fel 1916-ban, Einstein általános relativitáselmélete alapján, csak a közelmúltban sikerült kísérletileg is igazolni, hogy egyes galaxisok középpontjában fekete lyukak találhatók. Lásd még Kimberly Weaver: *The Galactic Odd Couple.* („Egy furcsa galaktikus pár”) <http://www.scientificamerican.com>, 2003. június 10.; Jean-Pierre Lasota: *Unmasking Black Holes.* („A fekete lyukak leleplezése”) *Scientific American*, 1999. május, 41–47. o.; Stephen Hawking: *Az idő rövid története a nagy bummtól a fekete lyukakig.* Budapest, 1989, Maecenas. Stephen Hawking: *Az idő rövid története – Az Ősrobbanástól a fekete lyukakig.* Budapest, 2005, Akkord.

[24] Joel Smoller és Blake Temple: *Shock-Wave Cosmology Inside a Black Hole* („Lökéshullám-kozmológia egy fekete lyuk belsejében”) *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100.20, 2003. szeptember 30, 11216–11218. o.

[25] Vernor Vinge: *First World.* („Első világ”) *Omni*, 1983. január., 10. o.

[26] Ray Kurzweil: *The Age of Intelligent Machines.* (*Az intelligens gépek kora*) Cambridge, Mass., 1989, MIT Press.

[27] Hans Moravec: *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence.* (*Az elme gyermekei: A robot- és emberi intelligencia jövője*) Cambridge, Mass., 1988, Harvard University Press.

[28] Vernor Vinge: *The Coming Technological Singularity: How to Survive in the Post-Human Era.* („A közelgő technológiai szingularitás: hogyan maradjunk életben a poszthumán korban”) VISION-21 Symposium, a NASA Lewis Research Center és az Ohio Aerospace Institute támogatásával, 1993. március. A szöveg megtalálható a következő címen: <http://www-rohan.sdsu.edu/faculty/vinge/misc/singularity.html>.

[29] Ray Kurzweil: *The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence.* (*A spirituális gépek kora: amikor a számítógépek meghaladják az emberi intelligenciát*) New York, 1999, Viking.

[30] Hans Moravec: *Robot: Mere Machine to Transcendent Mind.* (*Robot: a puszta géptől a transzcendentális tudatig*) New York, 1999, Oxford University Press.

[31] Damien Broderick: *The Spike: Accelerating into the Unimaginable Future.* (*A csúcs: száguldás az elképzelhetetlen jövőbe*) Sydney, 1997, Reed Books; valamint uő: *The Spike: How Our Lives Are Being Transformed by Rapidly Advancing Technologies.* (*A csúcs: hogyan változtatja meg életünket a sebesen fejlődő technológia*) New York, 2001, Tor/Forge. (javított kiadás)

[32] John Smart egyik áttekintése, a *What is Singularity?* („Mi a szingularitás?”) megtalálható a <http://www.kurzweilai.net/what-is-the-singularity> címen; John Smart összegyűjtött írásai a technológiai fejlődés gyorsulása, a szingularitás és az ezzel kapcsolatos témák körében megtalálhatók a <http://www.singularitywatch.com> és <http://www.Accelerating.org> címeken.

John Smart vezeti az *Accelerating Change* („Gyorsuló változás”) konferenciát, ami „a mesterséges intelligenciához és az intelligencia erősítéséhez” kapcsolódó témákat tárgyalja. Lásd <http://www.accelerating.org/ac2005/>.

[33] Az emberi agy elektronikus rendszeren futó másolata sokkal gyorsabb lenne, mint a biológiai agyunk. Noha az emberi agyat masszív párhuzamosság jellemzi (nagyságrendileg százmilliárd idegsejtkapcsolat, melyek mindegyike potenciálisan képes egyszerre működni), a kapcsolatok kapcsolódási sebessége rendkívül lassú a jelenkori elektronika sebességéhez képest.

[34] Lásd a második fejezet **[63]** és **[64]** jegyzeteit.

[35] Az információtechnológia exponenciális növekedésének a számítás ár–teljesítmény-arányára vonatkozó matematikai elemzését lásd *Még egy pillantás a gyorsuló megtérülések törvényére* c. függelékben.

[36] Alan Turing számítógép-teoretikus egy 1950-ben, a *Mind: A Quarterly Review of Psychology and Philosophy* című folyóiratban megjelent cikkében feltette a híres kérdést: „Tudnak-e a gépek gondolkodni? Honnan tudnánk, ha egy számítógép képes lenne gondolkodni?” A második kérdésre a Turing-teszt a válasz. A teszt jelenlegi definíciója szerint egy szakértőkből álló bizottság kérdezi a távoli jelöltet különböző témákban, úgymint szeretet, napi események, matematika, filozófia, a jelölt személyes élettörténete, hogy eldöntsék, a jelölt számítógép-e vagy ember. A Turing-tesztet az *emberi* intelligencia mérésére találták ki, a kudarc nem azt jelenti, hogy a jelölt nem intelligens. Turing eredeti cikke megtalálható a <http://www.abelard.org/turpap/turpap.php> címen; a tesztet illetően lásd még a *Stanford Encyclopedia of Philosophy* vonatkozó szócikkét, <http://plato.stanford.edu/entries/turing-test>.

Nem léteznek olyan trükkök vagy algoritmusok, amelyek lehetővé tennék, hogy egy gép átmenjen egy gondosan megtervezett Turing-teszten anélkül, hogy valóban teljesen emberi szintű intelligenciával rendelkezne. Lásd még Ray Kurzweil: *A Wager on the Turing Test:*

Why I think I Will Win. („Fogadás a Turing-tesztre: miért gondolom, hogy nyerni fogok”) <http://www.kurzweilai.net/a-wager-on-the-turing-test-why-i-think-i-will-win>

[37] Lásd John H. Byrne: Propagation of the Action Potential. („Az akciós potenciál terjedése”) *Neuroscience Online*, <https://oac22.hsc.uth.tmc.edu/courses/nba/s1/i3-1.html>: „Az akciós potenciál terjedési sebessége az idegekben 100 méter per szekundumtól az alig egytized méter per szekundumig terjedhet”.

Lásd még Kenneth R. Koehler: *The Action Potencial*. („Az akciós potenciál”) http://www.biophysics.uwa.edu.au/e_book/4d.html: „Az emlősök motoros idegsejtjeiben a jelterjedési sebesség 10–120 m/s, míg a nem mielinizált szenzoros idegsejteké kb. 5–25 m/s (a nem mielinizált idegsejtek folyamatosan, ugrások nélkül adják tovább az ingereket, az ionszivárgás gyakorlatilag teljes áramkörök létrejöttét teszi lehetővé, ám lelassítja a terjedést).”

[38] Egy a *Science* magazinban, 2002-ben megjelent tanulmány kiemeli a béta-katenin fehérje szerepét az emberi agykéreg horizontális tágulásában. Ez a fehérje kulcsszerepet játszik az agykéreg felszínének redőzöttségében; tulajdonképpen ez a redőzöttség növeli az agy ezen részének a felületét, és teremt helyet még több idegsejt számára. A fehérjét túlzott mennyiségben termelő egerek ráncos, redőzött agyat növesztettek, jelentősen nagyobb felszínnel, mint a kontrollegerek sima agykérgéé. Anjen Chenn és Christopher Walsh: *Regulation of Cerebral Cortical Size by Control of Cell Cycle Exit in Neural Precursors*. („Az agykéreg méretének szabályozása a neurális prekursorok sejtciklusa kilépési pontjának irányításával”) *Science* 297, 2002. július, 365–369. o.

Az emberek, csimpánzok és rézusmajmok agykérgi génkifejeződésének 2003-as összehasonlítása mindössze kilencvenegy, az agy szerveződésével és az észleléssel kapcsolatos gén kifejeződésében mutatott ki különbséget. A tanulmány szerzői meglepődve állapították meg, hogy ezeknek a különbségeknek a 90 százaléka up-reguláció (magasabb aktivitás) eredménye. Lásd M. Cacaes et al.: Elevated Gene Expression Levels Distinguish Human from Non-Human Primate Brains. („A felfokozott génexpressziós szint különbözteti meg az emberi agyat a nem emberi főemlős agytól”) *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100.22, 2003. október 28., 13030–13035. o.

Ugyanakkor a Kaliforniai Egyetem Irvine Orvostudományi Karának kutatói megállapították, hogy az IQ-t jobban meghatározza az agy egyes régióinak a szürkeállomány-mennyisége, mint az agy teljes mérete, illetve hogy az agy szürkeállományának csak mintegy hat százalékaról tűnik úgy, hogy kapcsolatban áll az IQ-val. A kutatások azt is kimutatták, hogy mivel ezek az intelligenciával kapcsolatba hozható területek az agy különböző részein helyezkednek el, nem valószínű, hogy létezne egy „intelligenciaközpont”, mint például a homloklebeny. Lásd *Human Intelligence Determined by Volume and Location of Gray Matter Tissue in Brain* („Az emberi intelligenciát az agy szürkeállományának nagysága és helye határozza meg”) a University of California–Irvine híre (2004. július 19.), http://today.uci.edu/news/release_detail.asp?Key=1187.

Egy 2004-ben folytatott kutatás kimutatta, hogy az emberi idegrendszer génei gyorsabb evolúciót mutatnak, mint a nem ember főemlősöké, illetve minden főemlős evolúciója gyorsabb, mint a többi emlősé. Steve Dorus et al.: Accelerated Evolution of Nervous System Genes in the Origin of *Homo sapiens*. („Az idegrendszer géneinek felgyorsult evolúciója a *Homo sapiens* eredetében”) *Cell*, 199, 2004. december 29., 1027–1040. o. Az eredmény értelmezése során Bruce Lahn, a kutatócsoport vezetője kijelenti: „Az ember nem néhány véletlen mutáció révén alakította ki kognitív képességeit, hanem számtalan mutációból, amelyek az összetett kognitív képességeket előnyben részesítő, rendkívül erőteljes kiválasztódás nyomán következtek be.” Catherine Gianaro, *University of Chicago Chronicle*, 24.7, 2005. január 6.

A kutatók felvetették, hogy az MYH16 izomrostgén egyetlen mutációja tette lehetővé, hogy az embernek nagyobb agya legyen. A mutáció meggyengítette az ősember állkapcsát, így már nem volt szükség a többi nagy testű majomfajtánál megtalálható, az agy méretét korlátozó tapadási felületekre. Stedman et al.: Myosin Gene Mutation Correlates with Anatomical Changes in the Human Lineage. („A miozin génmutáció egybeesése az emberi fejlődési vonal anatómiai változásaival”) *Nature* 428, 2004. március 25., 415–418. o.

[39] Robert A. Freitas, Jr.: Exploratory Design in Medical Nanotechnology: A Mechanical Artificial Red Cell. („Kísérleti tervezés az orvosi nanotechnológiában: egy mechanikus mesterséges vörösvértest”) *Artificial Cells, Blood Substitutes, and Immobil. Biotech*, 26 (1998) 411–430. o.; <http://www.foresight.org/Nanomedicine/Respirocytes.html>; lásd még a Nanomedicine Art Gallery képeit, <http://www.foresight.org/Nanomedicine/Gallery/Species/Respirocytes.html>, és egy díjnyertes animációt a mesterséges vörösvértestekről (respirocitákról), http://www.phleschbubble.com/album/movies/respirocyte_movie.htm.

[40] A fogletek ötlete J. Storrs Halltól, a Rutgers Egyetem professzorától, a nanotechnológia úttörőjétől származik. Egy részlet az ő leírásából: „A nanotechnológia a parányi, önmagukat replikáló robotokon alapul. A Utility Fog (kb. „műszerköd”) ennek az elgondolásnak a nagyon egyszerű kiterjesztése. Mi lenne, ha egy adott tárgy atomról atomra való felépítése helyett a parányi robotok (fogletek) összekapcsolódnának és kialakítanák a kívánt tárgy tömör, szilárd alakját? Ekkor, ha megunnánk az avantgárd dohányzóasztalokat, a robotok egyszerűen megváltoztatnák egy kicsit az elhelyezkedésüket, és kapnánk egy elegáns Anna-korabeli darabot.” J. Storrs Hall: What I Want to Be When I Grow Up, Is a Cloud. („Mi szeretnék lenni, ha nagy leszek? Egy felhő”) *Extropy*, 1994, 3. és 4. negyed. Megjelent a KurzweilAI.net-en, 2001. július 6-án: <http://www.kurzweilai.net/what-i-want-to-be-when-i-grow-up-is-a-cloud>. Lásd még J. Storrs Hall: Utility Fog: The Stuff That Dreams Are Made Of. („Műszerköd: az anyag, amiből az álmok vannak”) In: B. C. Crandall, szerk., *Nanotechnology: Molecular Speculations on Global Abundance*. (Nanotechnológia: molekuláris töprengések a globális bőségen) Cambridge, Mass., 1996, MIT Press, megjelent a KurzweilAI.net-en, 2001. július 5-én: <http://www.kurzweilai.net/utility-fog-the-stuff-that-dreams-are-made-of>.

[41] Sherry Turkle, szerk.: *Evocative Objects: Things We Think With.* („Evokatív objektumok: a dolgok, amikkel gondolkodunk”) Megjelenés előtt.

[42] Lásd *A számítási kapacitás exponenciális növekedése a XX. és a XXI. században* c. ábrát a második fejezetben. A számítási kapacitás ár–teljesítmény–arányának hatványozottan exponenciális növekedését kivétve a XXI. század végére ezer dollár értékű számítási kapacitás 1060 műveletet fog jelenteni másodpercenként. Ahogyan azt a második fejezetben tárgyalni fogjuk, az emberi agy funkcionális emulálásához szükséges számítás mennyiségének három különböző elemzése szerint hozzávetőlegesen másodpercenként 1015 művelet végrehajtására van szükség. Egy konzervatívabb becslés szerint, mely azt feltételezi, hogy az összes szinapszis és dendrit összes nem lineáris tulajdonságát is szimulálni kell, másodpercenként 1019 műveletre van szükség az emberi agy neuromorf emulálásához. Még ha a konzervatívabb számot vesszük is, 1029 műveletet kapunk a hozzávetőleg 1010 emberre. Így a másodpercenkénti 1060 művelet, amit 2099 táján ezer dollárért meg lehet venni, 1031 (tízmilliószor billiószor billió) emberi civilizációnak fog megfelelni.

[43] A gözzel hajtott szövőszék és a többi textilipari gép feltalálása a XVIII. század elején tönkretette a vidéki angol szövőmunkások megélhetését, akik évszázadok óta adták tovább nemzedékről nemzedékre családi műhelyeiket. A gazdasági hatalom a szövőcsaládoktól a gépek tulajdonosaihoz került. A legendák szerint egy fiatal, együgyű fiú, Ned Ludd ügyetlenségéből összetört két szövőgépet. Ettől kezdve akárhányszor rejtélyes körülmények között megrongálódott gépeket találtak, a gyanúba keveredettek csak azt mondták, hogy „Ned Ludd tette”. 1812-ben a kétségbeesett szövőmunkások létrehoztak egy titkos társaságot, egy városi gerillahadsereget. Megfenyegették a gyártulajdonosokat, követelésekkel léptek fel velük szemben, és sokan engedtek is nekik. Amikor azt kérdezték, ki a vezérük, így feleltek: „Ned Ludd tábornok, ki más?”. Noha a ludditák, ahogy később ismertté váltak, kezdetben a gépek ellen fordították dühüket, később egy sor véres összecsapásra is sor került. Végül a tory kormányzat megelégtelt a ludditák tevékenységét, és a hangadók bebörtönzése vagy felakasztása után a mozgalom elhalt. A ludditáknak nem sikerült ugyan tartós, sikeres mozgalmat indítaniuk, mégis a gépesítés és a technológia ellenzőinek jelképévé váltak.

[44] John Smart *Understanding Evolutionary Development: A Challenge for Futurists* („Az evolúciós fejlődés megértése: kihívás a futuristáknak”) című, a World Futurist Society éves ülésén, 2004. augusztus 3-án, Washingtonban tartott előadásának kivonata.

[45] Theodore Modis szerint az evolúció korszakos eseményei a komplexitás növekedését is jelentik. Lásd Theodore Modis: *Forecasting the Growth of Complexity and Change.* („A komplexitás és a változás növekedésének előrejelzése”) *Technological Forecasting and Social Change*, 69.4, 2002. <http://www.growth-dynamics.com/articles/TedWEB.htm>.

[46] Az adatállományok tömörítése kulcsfontosságú mind az adatátvitel (például a zene vagy szövegfájlok internetes továbbítása), mind az adattárolás szempontjából. Minél kisebb egy fájl, annál rövidebb ideig tart továbbítani, és annál kevesebb tárhelyet foglal. Az adattömörítés alapvető elméletét Claude Shannon matematikus, akit gyakran az információelmélet atyjának is neveznek, fogalmazta meg *A Mathematical Theory of Communication* című cikkében (*The Bell System Technological Journal* 27, 1948. július–október, 379–432. o., 623–56. o.) (E munkájának bővített változata könyv formájában is megjelent: [Shannon, C. E. – Weaver, W.](#): *A kommunikáció matematikai elmélete*. Budapest, 1986, OMIKK.) Az adattömörítés olyan tényezők miatt lehetséges, mint a redundancia (ismétlődés) és bizonyos karakterkombinációk előfordulásának valószínűsége az adatokban. Például egy hangfájlban a csendet le lehet cserélni egyetlen számra, amely a csend hosszát jelzi; vagy egy szövegfájlban a gyakori betűkombinációkat le lehet cserélni azokat kódoló rövidebb azonosítókra – ezzel tömörítve az adatállományt.

Shannon kifejtette, hogy a redundancia eltávolítható veszteségmentes tömörítési eljárásokkal, ami azt jelenti, hogy nem lesz információvesztés. A veszteségmentes tömörítésnek van korlátja, amit a Shannon által entrópia-aránynak nevezett tényező határoz meg (a tömörítés növeli az adatok „entrópiáját”, azaz a valódi információ mennyiségét, szemben az előre meghatározott és így megjósolható adatstruktúrákkal). Az adattömörítés eltávolítja a redundanciát az adatokból; a veszteségmentes tömörítés adatvesztés nélkül teszi ugyanezt (azaz az eredeti adatok pontosan helyreállíthatók). Ezzel szemben a képfájloknál, illetve a videó- és hangfájlok sugárzásánál használt veszteséges tömörítés információvesztéssel jár, bár ez általában érzékszerveinkkel észlelhetetlen mértékű.

A legtöbb adattömörítési eljárás egy kódot használ, ami a forrásban szereplő alapvető egységek (vagy szimbólumok) átírása egy kódábécébe. Például egy szövegfájlban szóközök egy sorozatát helyettesíteni lehet egy kódszóval és a szóközök számával. A kódábécé létrehozását és az új fájl azzal történő megírását egy tömörítési algoritmus végzi. A tömörített fájl kisebb lesz, mint az eredeti, s így könnyebben továbbítható, illetve tárolható. A leggyakoribb veszteségmentes tömörítési eljárások a következő kategóriákba sorolhatók:

- Futáshossz-tömörítés, ami az ismétlődő karaktereket egy kóddal és a karakter ismétlődéseinek számával írja le (például a PackBits és a PCX).
- Minimum redundanciájú vagy egyszerű entrópiakódolás, ami az előfordulási valószínűség szerint rendel kódokat a karakterekhez. A leggyakoribb szimbólumok kapják a legrövidebb kódokat (például a Huffman-kódolás és az aritmetikai kódolás).
- Szótárkódolók, amik dinamikusan frissített szimbólumszótárt használnak a mintázatok leírására (például a Lempel–Ziv, a Lempel–Ziv–Welch és a DEFLATE).
- Blokkrendező tömörítés, ami nem kódábécét használ, hanem átrendezi a karaktereket, ezután pedig futáshossz-tömörítéssel tömöríti az ismétlődő karaktersorozatokat (például a Burrows–Wheeler-transzformáció).
- Előrejelzés részleges feltérképezéssel, ami a tömörítetlen fájl szimbólumkészletét felhasználva jósolja meg, milyen gyakran fordul elő a következő szimbólum a fájlban.

[\[47\]](#) Murray Gell-Mann: What is Complexity? („Mi a komplexitás?”) Complexity, 1. kötet (New York: John Wiley and Sons, 1995).

[\[48\]](#) Az emberi genetikai kód hozzávetőlegesen hatmilliárd (körülbelül 10^{10}) bitből áll, eltekintve annak tömöríthetőségétől. Tehát az egykilogrammos sziklában elméletileg tárolható 10^{27} bit 10^{17} -szerese a genetikai kódunknak. A génkészlet tömörítését illetően lásd az [\[100\]](#) jegyzetet.

[\[49\]](#) Természetesen egy ember, aki szintén rengeteg részecskéből áll, hasonló mennyiségű információt tárol, mint egy azonos súlyú szikla, ha az összes részecske tulajdonságait vizsgáljuk. Akárcsak a szikla esetében, ennek az információnak a nagy részére nincs szükség a személy állapotának a leírásához. Másfelől egy személy jellemzéséhez sokkal több információ szükséges, mint egy szikláéhoz.

[\[50\]](#) A genetikai algoritmusok algoritmikus leírását illetően lásd az ötödik fejezet [\[506\]](#) jegyzetét.

[\[51\]](#) Az emberek, a csimpánzok, a gorillák és az orángutánok mind az emberszabásúak közé (a *Hominidae* családba) tartoznak. A feltételezések szerint az emberi ág öt-hétmillió évvel ezelőtt vált el emberszabású majom rokonaitól. A *Hominidae* családon belül a *Homo* nem olyan kihalt fajokat is felölel, mint a *Homo erectus*, de a modern embert, a *Homo sapiens* is.

A csimpánzok ujjai sokkal hosszabbak és görbébbek, mint az emberé, a hüvelykujjuk pedig rövidebb, gyengébb, és nem annyira mozgékony. A csimpánzok képesek hadonászni egy bottal, de általában gyenge a fogásuk. Nem tudnak erősen markolni, mert a hüvelykujjuk nem hajlik rá a mutatóujjukra. A modern ember hüvelykujja hosszabb, az ujjai egy középső tengely felé el tudnak fordulni, így az összes ujjunk hegyét össze tudjuk érinteni a hüvelykujjunk hegyével. Ezt a tulajdonságot nevezik teljes szembefordíthatóságnak. Többek között ezek a változások adtak az embernek két új fogásfajtát: a precíziós fogást és az erős fogást. Még az olyan prehominoid emberszabásúak, mint például az Etiópiában talált, körülbelül hárommillió évvel ezelőtt élt, Lucynak elnevezett *Australopithecus* is képes volt erősen és pontosan eldobni köveket. A tudósok szerint azóta a kéz dobásra és ütésre való képességének folyamatos fejlődése komoly előnyöket eredményezett a többi, hasonló nagyságú és tömegű állattal szemben. Lásd: Richard Young, Evolution of the Human Hand: The Role of Throwing and Clubbing. („Az emberi kéz evolúciója: a dobás és a bothasználat szerepe”) *Journal of Anatomy* 202 (2003): 165–74. o.; Frank Wilson, *The Hand: How Its Use Shapes the Brain, Language, and Human Culture* (A kéz: hogyan formálja a használata az agyat, a beszédet és az emberi kultúrát) (New York: Pantheon, 1998).

[\[52\]](#) A Santa Fe Intézet úttörő szerepet játszott a komplexitással és emergens rendszerekkel kapcsolatos elméletek és technológiák kifejlesztésében. A káosszal és komplexitással kapcsolatos paradigmák egyik legfontosabb megfogalmazója Stuart Kauffman. Az *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity* (Otthon a világegyetemben: az önszerveződés és a komplexitás törvényeinek keresése) (Oxford: Oxford University Press, 1995) című könyvében „a rend azon erőit keresi, amik a káosz határán rejlenek”.

John Tyler Bonner az *Evolution of Complexity by Means of Natural Selection* (A komplexitás evolúciója a természetes kiválasztódás révén) (Princeton: Princeton University Press, 1988) című könyvében a következő kérdéseket teszi fel: „Hogyan lesz egy tojásból bonyolult felnőtt egyed? Hogyan fejlődhetett ki egy baktériumból sokmillió év alatt egy elefánt?”

John Holland a Santa Fe Intézet egy másik vezető gondolkodója a komplexitás kibontakozó tudományterületén. A *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity* (Rejtett rend: Hogyan építi fel az alkalmazkodás a komplexitást) (Reading: Addison–Wesley, 1996) című könyvében egy sor, 1996-ban a Santa Fe Intézetben tartott előadása található meg. Lásd még John H. Holland, *Emergence: From Chaos to Order* (Emergencia: A káosztól a rendig) (Reading: Addison–Wesley, 1998) és Mitchell Waldrop, *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos* (Komplexitás: A felemelkedő tudomány a rend és a káosz határán) (New York: Simon & Schuster, 1992).

[\[53\]](#) A termodinamika második főtétele megmagyarázza, miért nem létezik olyan tökéletes motor, ami az üzemanyag elégetése során keletkező összes hőt (energiát) munkavégzésre fordítja: a hő egy része óhatatlanul elvész. Ugyanez a természeti törvény kimondja, hogy a meleg a forró serpenyőből a hideg levegőbe fog áramlani, nem pedig fordítva, illetve, hogy a zárt („izolált”) rendszerek spontán módon egyre rendezetlenebbé válnak az idő múlásával – azaz a rendezettségből a rendezetlenség felé tartanak. A jégkockák molekulái például csak korlátozott módokon helyezkedhetnek el. Így egy pohár jégkockának kisebb az entrópiája (rendezetlensége), mint a pohár víznek, ami ugyanebből a jégkockákból lesz, ha szobahőmérsékleten hagyjuk. A molekulák sokkal több lehetséges elrendeződést vehetnek fel a folyadékban, mint a jégben; a nagyobb mozgásszabadság pedig nagyobb entrópiát jelent. Az entrópiát multiplicitásként is fel lehet fogni. Minél többféleképpen valósítható meg egy állapot, annál nagyobb a multiplicitása. Így például egy egymásra dobált téglából álló halomnak nagyobb a multiplicitása (és az entrópiája), mintha szép szabályosan megrakták volna.

[\[54\]](#) Max More szerint „a fejlődő technológiák egyesülnek és megtermékenyítik egymást, és ezzel még jobban felgyorsítják a fejlődést”. Max More: Track 7 Tech Vectors to Take Advantage of Technological Acceleration. ManyWorlds, 2003. augusztus 1.

[\[55\]](#) További információért lásd J. J. Emerson et. al., Extensive Gene Traffic on the Mammalian X Chromosome. („Megnövekedett génforgalom az emlősök X-kromoszómáján”) *Science* 303.5657 (2004. január 23.): 537–40. o. <http://www.uta.edu/faculty/betran/pdfs/science2004.pdf>; Nicholas Wade, Y Chromosome Depends on Itself to Survive. („Az Y-kromoszóma megmaradása csak saját magán múlik”) *New York Times*, 2003. június 19.; Bruce T. Lahn és David C. Page, Four Evolutionary Strata on the Human X Chromosome. („Az emberi X-kromoszóma négy evolúciós rétege”) *Science* 286.5441 (1999. október 29.): 964–67. o., <http://pagelab.wi.mit.edu/pdf/1999 - Four evolutionary strata on the human X chromosome.pdf>.

Érdekes módon a lányok második X-kromoszómája kapcsolódik az X-inaktivációnak nevezett folyamat során, és így csak egy X-kromoszómán kerülnek kifejezésre a gének. Kimutatták, hogy egyes sejtekben az apától örökölt X-kromoszóma kapcsolódik ki, más sejtekben az anyától örökölt.

{56} Humane Genome Project, Insights Learned from the Sequence. („A szekvenciából leszűrt megállapítások”), http://www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/project/journals/insights.shtml. Noha az emberi genomot szekvenálták, jelentős része nem fehérjéket kódol (ez az úgynevezett hulladék DNS), ezért a kutatók még ma is vitatkoznak azon, hogy hány gént fognak azonosítani a hárommilliárd bázispár alkotta emberi DNS-ben. A jelenlegi becslések szerint kevesebb, mint harmincezer, bár a Humán Genom Projekt idején a becslések a százezret is elérték. Lásd: How Many Genes Are in the Human Genome? („Hány gén van az emberi genomban?”) (http://www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/faq/genenum.shtml) és Elizabeth Pennisi: A Low Number Wins the GeneSweep Pool. („Alacsony szám nyer a génlottón”) Science 300.5625 (2003. június 6.), 1484. o.

{57} Ezzel az elmélettel Niles Eldredge és a néhai Stephen Jay Gould állt elő 1972-ben (N. Eldredge és S. J. Gould, Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism, [„Megszakított egyensúlyok: alternatíva a fokozatos törzsfajlódással szemben”], in T. J. M. Schopf, szerk., Models in Paleobiology [Paleobiológiai modellek], [San Francisco: Freeman, Cooper], 82–115. o.). Az elmélet azóta is heves viták tárgya a paleontológusok és az evolúcióbíológusok között, bár egyre nagyobb az elfogadottsága. Az elmélet szerint a fajok akár évmilliókat is eltölthetnek viszonylag változatlanul, majd ezt a sztázist robbanásszerű változás követi, aminek eredményeképpen létrejön egy új faj, a régi pedig kihal (ezt nevezi Elisabeth Vrba „átfordító impulzusnak”). A hatás az egész ökoszisztémára kiterjed, és sok nem rokon fajt is érint. Eldredge és Gould javaslata új látásmódot igényelt: „Az adatok értelmezésénél a torzítás legnagyobb forrása az észrevétlenség. Az óhatatlanul is az evolúció hiányaként értelmezett sztázis soha nem is alkotta a vizsgálódás tárgyát. Mégis, milyen furcsa, hogy épp a leggyakoribb paleontológiai jelenséget nyilvánítjuk érdektelennek vagy szóra sem érdemesnek!” S. J. Gould és N. Eldredge, Punctuated Equilibrium Comes of Age. („A megszakított egyensúly beérése”) Nature 366, (1993. november 18.) 223–27. o.

Lásd még K. Sneppen et al., Evolution as Self-Organized Critical Phenomenon. („Az evolúció mint önszervező kritikus jelenség”) *Proceedings of the National Academy of Sciences* 92.11 (1995. május 23.) 5209–13. o.; Elisabeth S. Vrba, Environment and Evolution: Alternative Causes of the Temporal Distribution of Evolutionary Events. („Környezet és evolúció: az evolúciós események időbeli eloszlásának alternatív okai”) *South African Journal of Science* 81 (1985) 229–36. o.

{58} Amint arra a hatodik fejezetben ki fogok térni, ha a fénysebesség nem korlátozza alapvetően az információ eljuttatását a világegyetem távoli pontjaiba, akkor az intelligencia és a számítási technológia exponenciálisan fog terjedni, míg csak át nem itatja az összes anyagot és energiát, támogatva az egész világegyetemet átható számítást.

{59} A biológiai evolúció továbbra is fontos lesz az emberiség szempontjából, mivel az olyan betegségek, mint a rák és a vírusfertőzések az evolúciót használják fel ellenünk (azaz a ráksejtek és a vírusok változnak és alkalmazkodnak a gyógymódokhoz, például a kemoterápia során alkalmazott hatóanyagokhoz vagy az antivirális szerekhez). Az emberi intelligencia azonban legyőzheti a biológiai evolúciót, a megbetegedési folyamatok alapjainál avatkozva be, valamint olyan „koktél” módszereket alkalmazva, melyek egyszerre több, egymástól független téren veszik fel velük a küzdelmet.

{60} Andrew Odlyzko: Internet Pricing and the History of Communication. („Az internet ára és a kommunikáció története”) AT&T Labs Research, javított változat, 2001. február 8. <http://www.dtc.umn.edu/~odlyzko/doc/history.communications1b.pdf>.

{61} Cellular Telecommunications and Internet Association, Semi-Annual Wireless Industry Survey, 2004. június, <http://files.ctia.org/pdf/CTIAMidyear2004Survey.pdf>.

{62} Elektromosság, telefon, rádió, televízió, mobiltelefonok: FCC, http://www.fcc.gov/Bureaus/Common_Carrier/Notices/2000/fc00057a.xls. Személyi számítógépek és internethasználat: Eric C. Newburger, U. S. Census Bureau: Home Computers and Internet Use in the United States: August 2000. (2001. szeptember) <http://www.census.gov/prod/2001pubs/p23-207.pdf>. Lásd még: The Millennium Notebook. Newsweek, 1998. április 13., 14. o.

{63} A paradigmaváltás sebessége – az az idő, ami ahhoz kell, hogy egy új kommunikációs technológia elterjedjen – jelenleg kilencévenként megkétszereződik. (Azaz megkeleződik az az idő, ami a tömeges elterjedéséhez kell. A tömeges elterjedés alatt azt értem, hogy az Egyesült Államok lakosságának egynegyede használja.) Lásd még a {64} jegyzetet.

{64} Az „A találmányok tömeges elterjedése” ábra azt mutatja, hogy az elmúlt 130 évben egyenletesen csökkent az az idő, ami ahhoz kellett, hogy az Egyesült Államok lakosságának 25 százaléka használatba vegyen egy új találmányt. A telefonnak 35 év kellett, a rádióknak már csak 31 – azaz 11 százalékos csökkenés történt a két találmány között eltelt 21 év alatt, vagyis évente 0,58 százalékkal. A rádió és a televízió között évente 0,6 százalékkal csökkent ez az időtartam, a televízió és a PC között évente 1,0 százalékkal, a PC és a mobiltelefon között évente 2,6 százalékkal, a mobiltelefon és a világháló között pedig évente 7,4 százalékkal. A rádió tömeges elterjedéséhez 1897-től kezdődően 31 év kellett, az internetéhez 1991-től mindössze hét év – azaz 94 év alatt 77 százalékkal, átlagosan évente 1,6 százalékkal csökkent a tömeges elterjedés ideje. Ha ezt az arányt extrapoláljuk az egész XX. századra, akkor a század során összesen 79 százalékos csökkenést tapasztalhatunk. A jelenlegi, évi 7,4 százalékos csökkenéssel számolva mindössze húsz év kell majd ahhoz, hogy ugyanazt a 79 százalékos csökkenést elérjük, amit a teljes XX. század során elértünk. Ezek szerint a paradigmaváltás sebessége kilencévenként

megduplázódik (azaz a tömeges elterjedés ideje kilencévenként megkétszöröződik). A XXI. században a sebesség tizenegyszer fog megduplázódni, másképp kifejezve a 211-szeresére fog nőni, azaz körülbelül a 2000-szerese lesz a 2000. évi sebességnek. Sőt a sebességnövekedés valójában ennél is nagyobb lesz, mivel a jelenlegi sebességnövekedés is egyenletesen tovább fog nőni, ahogyan a XX. században is történt.

{65} Adatok 1967–1999-ből, az Intel adatai, lásd Gordon E. Moore: Our Revolution. („A mi forradalmunk”) <http://www.ohio.edu/people/starzyk/network/Class/ee515/Moore.pdf>. Adatok 2000–2016-ból, az ITRS 2002-es és 2004-es frissítései, <http://www.itrs.net/>

{66} Az ITRS által megadott DRAM-költség az egy bitre eső gyártási költség (csomagolva, mikrocentben). Adatok 1971–2000-ből: VLSI Research Inc. Adatok 2001–2002-ből: ITRS, 2002-es frissítés, 7a táblázat, Cost-Near-Term-Years, 172. o. Adatok 2003–2018-ből: ITRS, 2004-es frissítés, 7a és 7b táblázatok, Cost-Near-Term Years, 20–21. o.

{67} Az Intel és a Dataquest beszámolója (2002. december), lásd Gordon E. Moore: Our Revolution. („A mi forradalmunk”) <http://www.ohio.edu/people/starzyk/network/Class/ee515/Moore.pdf>.

{68} Randall Goodall, D. Fandel és H. Huffet: Long-Term Productivity Mechanisms of the Semiconductor Industry. („A félvezetőipar hosszú távú termelékenység mechanizmusa”) Ninth International Symposium on Silicon Materials Science and Technology, Philadelphia, 2002. május 12–17., az Electrochemical Society (ECS) és az International Sematech támogatásával.

{69} Adatok 1976–1999-ből: E. R. Berndt, E. R. Dulberger és N. J. Rappaport: Price and Quality of Desktop and Mobile Personal Computers: A Quarter Century of History. („Az asztali és hordozható személyi számítógépek ára és minősége: negyed század története”) 2000. július 17. Adatok 2001–2016-ból: ITRS, 2002-es frissítés, On-Chip Local Clock a 4c táblázatban: Performance and Package Chips: Frequency On-Chip Wiring Levels – Near-Term Years, 167. o.

{70} Az órajelet illetően lásd a ^{lxix} jegyzetet, az egy tranzisztorra eső költséget illetően lásd a ^{lxvii} jegyzetet.

{71} Intel tranzisztorok a mikroprocesszorokban: Microprocessor Quick Reference Guide, Intel Research, <http://www.intel.com/pressroom/kits/quickrefyr.htm>.

{72} Az Intel Corporation adatai. Lásd még Gordon Moore: No Exponential Is Forever... but We Can Delay 'Forever'. („Egyetlen exponenciális folyamat sem tart örökké... de el tudjuk nyújtani az 'örökkét'”) Előadás az International Solid State Circuits Conference-en (ISSCC), 2003. február 10., <http://cseweb.ucsd.edu/classes/wi10/cse241a/slides/mooreISSCC03.pdf>.

{73} Lásd a {65}–{67} és {65}–{74} jegyzeteket.

{74} Steve Cullen: Semiconductor Industry Outlook. („A félvezető-ipar kilátásai”) InStat/MDR, report no. IN0401550SI, 2004. április.

{75} World Semiconductor Trade Statistics. <http://www.wsts.org>.

{76} Bureau of Economic Analysis, U. S. Kereskedelmi Minisztérium, <http://www.bea.gov/bea/dn/home/gdp.htm>.

{77} ITRS, 2002-es frissítés, International Sematech.

{78} 25 Years of Computer History („A számítógépek történetének 25 éve”), <http://www.compros.com/timeline.html>; Linley Gwennap: Birth of a Chip. („Egy chip születése”), BYTE (1996. december), <http://www.landley.net/history/mirror/collate/art2.htm>; The CDC 6000 Series Computer. („A CDC 6000 számítógép”), <http://www.moorecad.com/s>; A Chronology of Computer History. („A számítógép történetének kronológiája”) <http://cuip.uchicago.edu/~cac/nlu/cts/chron.htm>; Mark Brader: A Chronology of Digital Computing Machines (to 1952). („A digitális számítógépek kronológiája (1952-ig)”), <http://www.davros.org/misc/chronology.html>; Karl Kempf: Electronic Computers Within the Ordnance Corps. („Elektronikus számítógépek a hadtápnál”) 1961. november, <http://ftp.arl.mil/~mike/comphist/61ordnance/index.html>; Ken Polsson: Chronology of Personal Computers. („A személyi számítógépek kronológiája”), <http://www.islandnet.com/~kpolsson/comphist>; The History of Computing at Los Alamos. („A számítástechnika története Los Alamosban”), http://www.lanl.gov/history/story.php?story_id=82; The Machine Room, <http://www.machine-room.org>; Mind Machine Web Museum, <http://userwww.sfsu.edu/hl/mmm.html>; Hans Moravec, <http://www.frc.ri.cmu.edu/~hpm/book97/ch3/processor.list>; PC Magazine Online: Fifteen Years of PC Magazine; Stan Augarten, Bit by Bit: An Illustrated History of Computers (Bitről bitre: a számítógépek képes története) (New York: Ticknor and Fields, 1984); International Association of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Annals of the History of the Computer 9.2 (1987) 150–53. o. és 16.3 (1994) 20. o.; Hans Moravec, Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence (Az elme gyermekei: A robot- és emberi intelligencia jövője) (Cambridge: Harvard University Press, 1988); René Moreau, The Computer Comes of Age (A számítógép felnőtté válása) (Cambridge: MIT Press, 1984).

{79} Az ebben a fejezetben „logaritmus skála” címkével ellátott grafikonok valójában úgynevezett féllogaritmus skálán ábrázolnak, vagyis az egyik tengely (az idő) lineáris, a másik pedig logaritmus beosztású. Az egyszerűség kedvéért azonban „logaritmus skálának” nevezem őket.

{80} Lásd az „Még egy pillantás a gyorsuló megtérülések törvényére” című függelék, ami matematikailag is levezeti, miért van két szintje a MIPS per egységárban mért számítási kapacitás exponenciális növekedésének (azaz miért növekszik egy adott időszakon belül még magának az exponenciális növekedésnek az üteme – az exponens – is).

{81} Hans Moravec: When Will Computer Hardware Match the Human Brain? („Mikor fog felérni a számítógépek hardvere az emberi aggyal?”) Journal of Evolution and Technology 1 (1998) <http://www.jetpress.org/volume1/moravec.pdf>.

{82} Lásd lxxvii jegyzet.

{83} Az ezer dollárra jutó egy MIPS-et 1900 és 1990 között sikerült elérni. Jelenleg körülbelül 400 naponként megduplázódik az ezer dollárra jutó MIPS értéke. Mivel a mai ár–teljesítmény-arány körülbelül 2000 MIPS per ezer dollár, ez az arány naponta 5 MIPS-szel, vagyis körülbelül ötóránként egy MIPS-szel javul.

{84} IBM Details Blue Gene Supercomputer. („Az IBM részleteket árul el a Blue Gene szuperszámítógépről”) CNET News, 2003. május 8., http://news.cnet.com/2100-1008_3-1000421.html.

{85} Lásd Alfred North Whitehead, An Introduction to Mathematics (Bevezetés a matematikába) (London: Williams and Norgate, 1911), amit ugyanakkor írt, amikor Bertrand Russel korszakos, háromkötetes Principia Mathematicáján dolgozott.

{86} Noha eredetileg tizenöt évesre tervezték, „a Human Genome Project két és fél évvel korábban fejeződött be, 1991-es árfolyamon számolva 2,7 milliárd dollárba került, azaz jelentősen kevesebbe, mint eredetileg tervezték”: http://www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/project/50yr/press4_2003.shtml.

{87} Human Genome Project Information, http://ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/project/privatesector.shtml; Stanford Genome Technology Center, <http://sequence-www.stanford.edu/group/techdev/auto.html>; National Human Genome Research Institute, <http://www.genome.gov>; Tabitha Powledge: How Many Genomes Are Enough? („Hány genom elég?”) Scientist, 2003. november 17., <http://www.the-scientist.com/?articles.view/articleNo/22597/title/How-many-genomes-are-enough/>.

{88} Az adatok forrása: National Center for Biotechnology Information, „GenBank Statistics”, javítva 2004. május 4-én, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/Genbank/genbankstats.html>.

{89} A súlyos akut légzőszervi szindrómát (SARS) harmincegy napon belül szekvenálták, miután a Brit-Kolumbiai Rákellenes Ügynökség és az Amerikai Járványügyi Központ azonosította a vírust. A két központ szekvenálása mindössze tíz bázispárban tért el a huszonkilencezerből. Ez alapján a SARS vírust koronavírusként azonosították. Dr. Julie Gerberding, a CDC igazgatója szerint a gyors szekvenálás „olyan tudományos teljesítmény, aminek szerintem nincs párja a történelemben”. Lásd K. Philipkoski: SARS Gene Sequence Unveiled. („A SARS génszekvenciájának leleplezése”) Wired News, 2003. április 15., <http://www.wired.com/medtech/health/news/2003/04/58481>.

Ezzel szemben a HIV szekvenálása az 1980-as években kezdődött el. A HIV 1-et és a HIV 2-t 2003-ban és 2002-ben szekvenálták teljes mértékben. National Center for Biotechnology Information <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>. A Los Alamos National Laboratory által fenntartott HIV-szekvencia adatbázis: <http://www.hiv.lanl.gov/>.

{90} Mark Brader: A Chronology of Digital Computing Machines (to 1952). („A digitális számítógépek kronológiája (1952-ig)”), <http://www.davros.org/misc/chronology.html>; Richard E. Matick: Computer Storage Systems and Technology (Számítástechnikai tárolórendszerek és technológiák) (New York: John Wiley and Sons, 1977); University of Cambridge Computer Laboratory, EDSAC99, <http://www.cl.cam.ac.uk/UoCCL/misc/EDSAC99/statistics.html>; Mary Bellis: Inventors of the Modern Computer: The History of the UNIVAC Computer – J. Presper Eckert and John Mauchly. („A modern számítógép feltalálói: az UNIVAC számítógép története – J. Presper Eckert és John Mauchly”), <http://inventors.about.com/library/weekly/aa062398.htm>; Initial Date of Operation of Computing Systems in the USA (1950–1958) („A számítógéprendszerek működésének kezdete az Egyesült Államokban (1950–1958)”), az OECD 1968-as adatai alapján <http://members.iinet.net.au/~dgreen/timeline.html>; Douglas Jones, Frequently Asked Questions about the DEC PDP-8 computer („Gyakran ismételt kérdések a DEC PDP-8 számítógépről”) http://rtfm.mit.edu/pub/usenet/alt.sys.pdp8/PDP-8_Frequently_Asked_Questions_%28posted_every_other_month%29; Programmed Data Processor–1 Handbook (PDP-1 kézikönyv), Digital Equipment Corporation (1960–1963); John Walker: Typical UNIVAC® 1108 Prices: 1968 („Jellemző UNIVAC® 1108 ára: 1968”), <http://www.fourmilab.ch/documents/univac/config1108.html>; Jack Harper, LISP 1.5 for the Univac 1100 Mainframe. („LISP 1.5 az Univac 1100 mainframe-re”), <http://www.frobenius.com/univac.htm>; Wikipedia, Data General Nova <http://www.answers.com/topic/data-general-nova>; Darren Brewer: „Chronology of Personal Computers 1972–1974. („A személyi számítógépek kronológiája, 1972–1974”)”, http://uk.geocities.com/magoos_universe/comp1972.htm; www.pricewatch.com; (11/17/04); <http://sharkyextreme.com/>; Byte hirdetések, 1975. szeptember–1998. március; PC Computing hirdetések, 1977. március–2000. április.

{91} Seagate, „Products”, <http://www.seagate.com/cda/products/discsales/index>; Byte hirdetések, 1977–1998; PC Computing hirdetések, 1999. március; Editors of Time-Life Books: Understanding Computers: Memory and Storage. (A számítógépről egyszerűen: memória és tárhely) Javított kiadás (New York: Warner Books, 1990); Historical Notes about the Cost of Hard Drive Storage Space. („Történelmi feljegyzés a merevlemez tárolóhely áráról”), <http://www.alts.net/ns1625/winchest.html>; IBM 305 RAMAC Computer with Disk Drive, <http://www.cedmagic.com/history/ibm-305-ramac.html>; John C. McCallum: Disk Drive Prices (1955–

2004). <http://www.jcmit.com/diskprice.htm>.

{92} James DeRose, The Wireless Data Handbook (A vezeték nélküli adatátvitel kézikönyve), (St. Johnsbury: Quantum, 1996); First Mile Wireless, <http://www.firstmilewireless.com/>; J. B. Miles: Wireless LANs. („Vezeték nélküli helyi hálózatok”) Government Computer News 18.28 (1999. április 30.), <http://www.gcn.com/>; Wireless Week (1997. április 14.), <http://www.wirelessweek.com/>; Office of Technology Assessment, „Wireless Technologies and the National Information Infrastructure” („Vezeték nélküli technológiák és az országos informatikai infrastruktúra”), 1995. szeptember, <http://www.fas.org/ota/reports/9547.pdf>; Signal Lake, „Broadband Wireless Network Economics Update” („Helyzetjelentés a széles sávú vezeték nélküli hálózatok piacról”), 2003. január 1. 4. o., <http://www.signallake.com/publications/broadbandupdate.pdf>; BridgeWave Communications híradás, <http://www.bridgewave.com/050604.htm>.

{93} Internet Software Consortium (<http://www.isc.org>), ISC Domain Survey: Number of Internet Hosts, <http://www.isc.org/ds/host-count-history.html>.

{94} Uo.

{95} Az éves internetforgalom becslésére az Egyesült Államok gerinchálózatának átlagos decemberi internetforgalmát szokták felhasználni. A. M. Odlyzko: Internet Traffic Growth: Sources and Implications. („Az internetforgalom növekedése: források és következtetések”) Optical Transmission Systems and Equipment for WDM Networking II (Optikai átviteli rendszerek és eszközök WDM hálózatokhoz II), B. B. Dingel, W. Weiershausen, A. K. Dutta és K.-I. Sato, szerk., Proc SPIE (Nemzetközi Optikai Mérnöki Társaság) 5247 (2003) 1–15, <http://www.dtc.umn.edu/~odlyzko/doc/oft.internet.growth.pdf>; a 2003–2004-es értékek forrása: e-mail levelezés A. M. Odlyzkoval.

{96} Dave Kristula, The History of the Internet. („Az internet története”) (1997. március, frissítve 2001. augusztusában), <http://davesite.com/webstation/net-history.shtml>; Robert Zakon: Hobbes’ Internet Timeline v8.0. („Hobbes internet-kronológiája v8.0”), <http://www.zakon.org/robert/internet/timeline>; Converge Network Digest, 2002. december 5.; V. Cerf: Cerf’s Up. 2004, http://global.mci.com/de/resources/cerfs_up/.

{97} H. C. Nathanson et al.: The Resonant Gate Transistor. („A rezonáns alagút-tranzisztor”) IEEE Transactions on Electron Devices 14.3 (1967. március) 117–33. o.; Larry J. Hornbeck: 128×128 Deformable Mirror Device. IEEE Transactions on Electron Devices 30.5 (1983. április) 539–43. o.; J. Storrs Hall: Nanocomputers and Reversible Logic. („Nanoszámítógépek és reverzibilis logika”) Nanotechnology 5 (1994. július) 157–67. o.; V. V. Aristov et al.: A New Approach to Fabrication of Nanostructures. („A nanostruktúrák létrehozásának új megközelítése”) Nanotechnology 6 (1995. április) 35–39. o.; C. Montemagno et al.: Constructing Biological Motor Powered Nanomechanical Devices. („Biológiai motorral hajtott nanomechanikus eszközök készítése”) Nanotechnology 10 (1999): 225–31. o.; <http://www.foresight.org/Conferences/MNT6/Papers/Montemagno/>; Celeste Biever: Tiny „Elevator’ Most Complex Nanomachine Yet. („A parányi „lift’ az eddigi legösszetettebb nanogépezet”) NewScientist.com News Service, 2004. március 18., <http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn4794>.

{98} ETC Group, From Genomes to Atoms: The Big Down. („A genomoktól az atomokig: a nagy zuhanás”) 39. o., <http://www.etcgroup.org/>.

{99} Uo., 41. o.

{100} Noha a genom információtartalmát nem lehet pontosan meghatározni, az ismétlődő bázispárok miatt egyértelműen kisebb, mint a tömörítetlen adatok mérete. Két megközelítés is létezik a genom tömörített információtartalmának a meghatározására, és mindkettő azt bizonyítja, hogy a harminc-százmillió byte egy konzervatív, azaz magas becslés.

1. Ami a tömörítetlen adatokat illeti, az emberi genetikai kódban hárommilliárd DNS-bázispár van, és mindegyik két bitet kódol (mivel minden egyes bázispár négyféle lehetőséget jelent). Így az emberi genom tömörítetlenül körülbelül 800 millió byte nagyságú. A nem kódoló DNS-t régen „hulladék DNS-nek” nevezték, de ma már nyilvánvaló, hogy fontos szerepe van a génexpresszióban. Mindazonáltal nagyon gazdaságtalanul kódolt. Először is, nagyon nagy mértékű a redundanciája (például az „ALU” nevű szekvencia több százezerszer ismétlődik), amit a tömörítő algoritmusok ki tudnak használni.

A genetikai adatbankok közelmúltbeli, robbanásszerű növekedése nyomán nagyon megnőtt az érdeklődés a genetikai adatok tömörítése iránt. A standard adattömörítő algoritmusok genetikai adatokra való alkalmazását megcélzó legújabb kutatásokból az derült ki, hogy lehetséges akár kilencven százalékkal is tömöríteni az adatokat (anélkül, hogy egyetlen bit is elveszne), lásd Hisahiko Sato et al.: DNS Data Compression in the Post Genome Era. („A DNS adatainak tömörítése a genom feltérképezése utáni korban”) *Genome Informatics* 12 (2001): 512–14. o., <http://www.jsbi.org/pdfs/journal1/GIW01/GIW01P130.pdf>.

Ezek szerint a genomot körülbelül 80 millió byte-ra lehet tömöríteni információvesztés nélkül (azaz tökéletesen rekonstruálható lesz a teljes 800 millió byte-nyi tömörítetlen genom).

Most gondoljunk bele, hogy a genom több mint 98 százaléka nem fehérjéket kódol! A nem kódoló régiók algoritmikus tartalma még a standard adattömörítés (ami megszünteti a redundanciákat, és szótárban rögzíti a gyakori szekvenciákat) után is meglehetősen alacsony, ami azt jelenti, hogy valószínűleg le tudnánk kódolni egy algoritmust, ami ugyanezt a feladatot végezné el, kevesebb bittel. Mindazonáltal, mivel még csak a genom visszafejtésének elején járunk, nem adhatunk megbízható becslést arról, milyen mértékű további csökkenésre számíthatunk a funkcionálisan ekvivalens algoritmus alapján. Ezért használom a 30–100 millió byte-os tartományt a genom tömörített

információtartalma kapcsán. A tartomány felső határa csak adattömörítést feltételez, algoritmikus egyszerűsítés nélkül.

Mindennek az információnak csak egy része (bár a többsége) írja le az agy felépítését.

2. A másik gondolatmenet a következő: noha az emberi genomnak körülbelül 3 milliárd bázispárja van, ahogy fentebb említettük, ennek csak egy kis százaléka kódol fehérjéket. A jelenlegi becslések szerint körülbelül 26 000 ilyen génünk van. Ha feltételezzük, hogy ezek a gének átlagosan 3000 bázisnyi hasznos adatot tartalmaznak, ez körülbelül 78 millió bázisnak felel meg. Egy DNS-bázis mindössze két bit, azaz körülbelül 20 millió byte-ról beszélünk (78 millió bázis osztva négygyel). Egy gén fehérjekódoló szekvenciái három DNS-bázisból álló „szavak” (kodonok), melyek egy-egy aminosavvá transzlálódnak. Ennél fogva 4^3 (64) lehetséges kodonkód létezik, mindegyik három DNS-bázisból áll. Mindazonáltal a lehetséges 64-ből mindössze 20 aminosav jön létre, plusz egy stop kodon (null aminosav). 4^3 kód fennmaradó része a 21 hasznos kód szinonimájaként kerül felhasználásra. Míg a 64 lehetséges kombináció kódolásához 6 bit szükséges, a 21 lehetőségéhez mindössze körülbelül $4,4$ ($\log_2 21$) bit kell, azaz a 6 bitből megspórolható 1,6 (mintegy 27 százalék), és így a fenti 20 millió byte-os érték is 15 millióra csökken. Emellett itt alkalmazható némi standard tömörítés is az ismétlődő szekvenciákra (bár a DNS fehérjekódoló részén sokkal kisebb tömörítési arány érhető el, mint az ún. hulladék DNS-en, amelynek igen nagy a redundanciája). Ezt is számításba véve valószínűleg 12 millió byte alá lehet csökkenteni ezt a számot. Mindazonáltal ehhez hozzá kell adnunk a DNS nem kódoló, a génexpressziót vezérlő részére vonatkozó információt. Noha a DNS-nek ez a része alkotja a genom túlnyomó többségét, úgy tűnik, nagyon alacsony az információtartalma, és rendkívül redundáns. Azt becsülve, hogy körülbelül ugyanúgy 12 millió byte-ot tesz ki, mint a fehérjekódoló DNS, ismét csak hozzávetőlegesen 24 millió byte-ot kapunk. Ebből a szempontból a 30-tól 100 millió byte-ig terjedő becslés konzervatívan magas.

[\[101\]](#) A folytonos értékeket bármilyen kívánt pontossáig ábrázolni lehet lebegőpontos számokkal. A lebegőpontos számok két bitsorozatból állnak. Például 2-es alapú lebegőpontos számok esetében, a „mantissának” nevezett sorozat egy 1 és 2 közé eső számot ábrázol („értékes jegyek”), a „karakterisztikának” nevezett sorozat pedig azt adja meg, hogy az alap – jelen esetben a 2 – hányadik hatványával kell megszorozni a mantissza jelentette számot („exponens”). Minél több bitet tartunk fenn a mantissának, annál pontosabb számot tudunk tárolni.

[\[102\]](#) Stephen Wolfram, *A New Kind of Science* (Egy újfajta tudomány) (Champaign: Wolfram Media, 2002).

[\[103\]](#) A fizika digitális elméletének egyik korai megfogalmazása szintén megtalálható Frederick W. Kantor, *Information Mechanics* (Információmechanika) (New York: John Wiley and Sons, 1977) c. művében.

[\[104\]](#) Konrad Zuse: *Rechnender Raum. Elektronische Datenverarbeitung*, 1967, 8. kötet, 336–44. o. Konrad Zuse könyve a sejtautomatákon alapuló világegyetemről két évvel később jelent meg: *Rechnender Raum, Schriften zur Datenverarbeitung* (Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn, 1969). Angol fordítás: *Calculating Space* (Számító űr), MIT Technical Translation AZT-70-164-GEMIT, 1970. február. MIT Project MAC, Cambridge, MA 02139.PDF.

[\[105\]](#) Edward Fredkin, idézi Robert Wright: *Did the Universe Just Happen?* („Csak úgy megtörtént a világegyetem?”), *Atlantic Monthly*, 1988. április, 29–44. o., <http://www.theatlantic.com/past/docs/issues/88apr/wright.htm>.

[\[106\]](#) Uo.

[\[107\]](#) Fredkin jó pár eredménye a számításról alkotott saját modelljéből származik, ami explicit módon tükrözi a fizika számos alapelvét. Lásd Edward Fredkin és Tommaso Toffoli: *Conservative Logic*. („Konzervatív logika”), *International Journal of Theoretical Physics* 21.3–4. (1982): 219–53. o., http://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall06/cos576/papers/fredkin_toffoli82.pdf. A számítás fizikájával kapcsolatos, analitikus szempontból a Fredkinéhez hasonló fenntartások megtalálhatók Norman Margolus *Physics and Computation* („Fizika és számítástechnika”) című PhD-disszertációjában (MIT/LCS/TR-415, MIT Laboratory for Computer Science, 1988).

[\[108\]](#) Norbert Wiener és Ed Fredkin információfelfogását, miszerint a fizika és a valóság egyéb szintjeinek alapvető építőeleme az információ, 1990-ben publikált *The Age of Intelligent Machines* (Az intelligens gépek kora) című könyvemben tárgyaltam.

Hihetetlenül nehéz feladatnak bizonyult a teljes fizikát számítási transzformációkra lefordítani, de Fredkin folytatja a próbálkozást. Wolfram az elmúlt évtizedben munkássága jelentős részét ennek az elképzelésnek szentelte, bár szemmel láthatólag csak korlátozott mértékű kommunikációt folytatott a fizikustársadalom néhány más tagjával, akik szintén ezt a célt tűzték ki maguk elé. Wolfram célja „nem a fizika egy konkrét, végső modelljének a megalkotása”, hanem ahogyan *Note for Physicists* (Feljegyzés a fizikusoknak) című írásában (ami lényegében egy nagy feladat kitűzése) megfogalmazza, „azoknak a jellemzőknek a megtalálása, amikkel egy ilyen modell rendelkezne” (*A New Kind of Science [Egy újfajta tudomány]*, 1043–65. o., <http://www.wolframscience.com/nksonline/page-1043c-text>).

A *The Age of Intelligent Machines* (Az intelligens gépek kora) című könyvemben tárgyalom „a kérdést, hogy a valóság végső természete analóg vagy digitális-e”, és rámutatok, hogy „ahogy egyre mélyebbre hatolunk a természetes és mesterséges folyamatokban, azt látjuk, hogy a folyamatok természete gyakran váltakozik az információ analóg és digitális ábrázolása között”. Illusztrációként a hangot hoztam fel. Az agyunkban a zene a *cochlea* (a belső fül csigája) idegsejtjeinek különböző frekvenciákat jelentő, digitális kisüléseként jelenik meg. A levegőben és a hangszórókhoz vezető vezetékekben viszont analóg formában terjed. A kompakt lemezen digitális formában rögzítjük a hangot, és digitális áramkörök értelmezik a jeleket. A digitális áramkörök azonban tranzisztorokból állnak, amelyek analóg erősítők. Erősítőkként a tranzisztorok az egyes elektronokat manipulálják, amelyek megszámlálható részecskéket, ám mélyebb

színt az analóg kvantum-mezőegyenletek határozzák meg őket. Még mélyebb szinten pedig Fredkin és Wolfram elmélete szerint digitális (számítási) alapja van ezeknek a folytonos egyenleteknek.

Azt is meg kell jegyeznünk, hogy ha valakinek sikerülne megalkotnia a fizika digitális elméletét, akkor meg kellene vizsgálnunk, tulajdonképpen miféle mélyebb mechanizmusok implementálják a sejtautomaták számításait és kapcsolódásait. A világegyetemet működtető sejtautomaták mögött talán még alapvetőbb analóg jelenségek rejlenek, amelyek a tranzistorokhoz hasonlóan, küszöbértékek által vezérelve hajtanak végre digitális tranzakciókat. Azaz hiába teremtenénk meg a fizika digitális alapjait, ez még nem döntené el azt a filozófiai vitát, hogy a valóság végső soron digitális-e vagy analóg. Mindazonáltal a fizika működő számítási modelljének a felállítása már óriási előrelépés lenne.

Mennyire valószínű ez? Azt könnyen bebizonyíthatjuk, hogy a fizika digitális modellje létrehozható, hiszen a folytonos függvények mindig, bármilyen kívánt pontossággal kifejezhetők diszkrét értékváltozásokon végrehajtott diszkrét transzformációkkal. Végső soron ez a differenciál- és integrálszámítás alapja. Ugyanakkor a folytonos függvények ily módon történő kifejezése eredendően bonyolult, és szemben áll Einstein véleményével, miszerint „a lehető legegyszerűbben, de nem annál is egyszerűbben” kell leírunk a dolgokat. A valódi kérdés tehát az, hogy ki tudjuk-e fejezni az általunk ismert alapvető összefüggéseket elegánsabban, sejtautomata-algoritmusok felhasználásával. A fizika új elméletének az egyik próbája az, hogy képes-e ellenőrizhető előrejelzéseket tenni. Ez pedig legalább egy fontos szempontból komoly kihívás lehet a sejtautomata-alapú elméletnek, hiszen az előrejelezhetőség hiánya a sejtautomaták egyik alapvető jellemzője.

Wolfram azzal kezdi, hogy a világegyetemet csomópontok hatalmas hálózataként írja le. A csomópontok nem a „térben” léteznek, hanem a tér, ahogy mi érzékeljük, egy illúzió, amit a jelenségek sima átmenete hoz létre a csomópontok hálózatán. Könnyen elképzelhetjük, hogy felépítünk egy ilyen hálózatot a „naiv” (newtoni) fizika leképzésére: egyszerűen egy háromdimenziós, tetszőleges szemsűrűségű hálózatot kell létrehozni. Az olyan jelenségek, mint a térben mozognak tűnő „részcscék” és „hullámok” „sejtvitorlásokként”, azaz a hálózatban minden egyes számítási ciklusban előrehaladó mintázatokként jelennének meg. A sejtautomatákon alapuló számítógépes életjátékok rajongói számára ismerősek lesznek a vitorlások és a sokféle minta, amelyek könnyedén végig tudnak haladni egy sejtautomata-hálózaton. Maga a fénysebesség pedig az égi számítógép órajeléből ered, mivel a vitorlások órajelciklusonként legfeljebb egy cellát tudnak haladni.

Einstein általános relativitáselméletét, amely szerint a gravitáció magának a térnek a perturbációja, mintha a háromdimenziós világunk meg lenne hajlítva valamilyen láthatatlan negyedik dimenzióban, szintén egyszerű ábrázolni ebben a rendszerben. Elképzelhetünk egy négydimenziós hálózatot, és ugyanúgy ábrázolhatjuk a tér látszólagos görbületeit, ahogyan a közönséges görbületeket a háromdimenziós térben. A hálózat sűrűbbé is válhat bizonyos régiókban, hogy az ilyen görbületek megfelelőit ábrázolja.

A sejtautomata-koncepció hasznosnak bizonyul az entrópiának (rendezetlenségnek) a termodinamika második törvényéből következő, látszólagos növekedése magyarázatában is. Fel kell tételeznünk, hogy a világegyetemet irányító sejtautomata-szabály 4. osztályú szabály (lásd a főszöveget) – különben a világegyetem nagyon unalmas hely lenne. Wolfram alapvető megfigyelése, hogy a 4. osztályú sejtautomaták hamar létrehozzák a látszólagos véletlenszerűséget (determináltságuk ellenére), konzisztens azzal a véletlenszerűségre való hajlammal, amelyet a Brown-mozgásban láthatunk, és ami a termodinamika második törvényéből következik.

A speciális relativitáselmélet nehezebb ügy. A newtoni modellt könnyen le lehet képezni a celluláris hálózatban. A newtoni modell azonban érvényét veszíti a speciális relativitáselmélet esetében. A newtoni világban, ha egy vonat nyolcvan mérföld per óra sebességgel halad a vágányán, mi pedig hatvan mérföld per óra sebességgel haladunk a vágánnyal párhuzamos úton, akkor úgy fog tűnni, hogy a vonat húsz mérföld per óra sebességgel távolodik tőlünk. A speciális relativitáselmélet világában azonban, ha háromnegyed fénysebességgel elhagyjuk a Földet, a fény továbbra is teljes sebességgel fog távolodni tőlünk. Összhangban ezzel a látszólag paradox perspektívával, két megfigyelő számára a relatív sebességük függvényében más és más lesz az idő mértéke és szubjektív múlása. Ennélfogva a tér és a csomópontok rögzített rendszere sokkal bonyolultabbá válik. Lényegében minden egyes megfigyelőnek saját hálózata lesz. Mindazonáltal a speciális relativitás kapcsán lényegében ugyanazt az átalakítást kell elvégeznünk a „newtoni” sejtautomata-hálózaton, mint a newtoni fizikai téren. Az azonban nem egyértelmű, hogy így egyszerűbben tudjuk-e reprezentálni a speciális relativitáselméletet.

A valóság hálózatként való ábrázolásának a legnagyobb előnye abban rejlik, hogy segít megérteni a kvantummechanika jelenségének bizonyos aspektusait. Magyarázattal szolgálhat a kvantumjelenségekben megfigyelhető látszólagos véletlenszerűségre. Gondoljunk például a részecske-antirészecske párok hirtelen és látszólag véletlenszerű létrejöttére! Ez a véletlenszerűség talán ugyanolyan, mint amelyet a 4. osztályú sejtautomatáknál figyelhetünk meg. Noha determináltak, a 4. osztályú sejtautomaták viselkedését nem lehet előre jelezni (csak magának a sejtautomatának a működtetésével), és így gyakorlatilag véletlenszerűek.

Ez a nézet nem új. Megfelel a kvantummechanika „rejtett változók” megfogalmazásának, amelynek értelmében vannak bizonyos változók, amikhez nem férünk hozzá, és amelyek az általunk megfigyelt, véletlenszerűnek tűnő viselkedést szabályozzák. A kvantummechanika rejtettváltozó-felfogása nem összeegyeztethetetlen a kvantummechanika egyenleteivel. Lehetséges, de nem népszerű a kvantumfizikusok körében, ugyanis nagyon sok előfeltételnek kell hozzá teljesülnie, nagyon különleges módokon. Én azonban nem tekintem ezt elégséges érvnek ahhoz, hogy elvessük. Önmagában a világegyetemünk létezése is elég valószínűtlen, és sok előfeltételnek kell teljesülnie ahhoz, hogy a jelen formájában működjön. Mégis itt vagyunk.

A nagyobb kérdés az, hogyan lehet próbára tenni a rejtett változók elméletét? Ha sejtautomata-szerű folyamatokon alapulnak, akkor a rejtett változók eredendően megjósolhatatlanok, még ha determinisztikusak is. Valamilyen más módszert kell találnunk a rejtett változók „leleplezésére”.

Wolfram világegyetemről alkotott hálózاتفelfogása lehetséges perspektívát kínál a kvantum-összefonódás és a hullámfüggvény összeomlása jelenségének megértéséhez. A hullámfüggvény összeomlasztását, ami egy részecske látszólag ellentmondásos tulajdonságait (például a helyzetét) visszamenőleg determinálttá teszi, a celluláris hálózat szempontjából a megfigyelt jelenség és a megfigyelő kölcsönhatásának is lehet tekinteni. Megfigyelőkként nem a hálózaton kívül vagyunk, hanem azon belül létezünk. A celluláris mechanikából tudjuk, hogy két entitás nem léphet kölcsönhatásba anélkül, hogy mindkettő meg ne változna, amiből pedig következik a hullámfüggvény összeomlásának az alapja.

Wolfram így ír: „Ha a világegyetem egy hálózat, akkor bizonyos értelemben könnyedén tartalmazhat olyan szálakat, amelyek akkor is összekötik a részecskéket, amikor azok a közönséges térbeli értelemben eltávolodnak egymástól.” Ez magyarázatul szolgálhat azokra az új, drámai kísérletekre, amelyekben két „kvantum-összefonódott” részecske a köztük lévő nagy térbeli távolság ellenére is egymással összhangban viselkedik. Einstein ezt „kísérteties távoli viselkedésnek” nevezte, és elvetette, de a legújabb kísérletek azt látszanak bizonyítani, hogy a jelenség mégis létezik.

Egyes jelenségek jobban beleillenek ebbe a cellulárishálózat-felfogásba, mint mások. Egyes felvetések elegánsnak tűnnek, de ahogy Wolfram *Note for Physics* („Feljegyzés a fizikusoknak”) című írása egyértelművé teszi, a teljes fizika konzisztens, sejtautomata-alapú rendszerbe való lefordítása valóban óriási feladat.

Wolfram a filozófia területére áttérve a szabad akarat látszólagos jelenségét determinált, de nem előrejelezhető döntésként „magyarázza”. Mivel a celluláris folyamatok kimenetelét nem lehet a folyamatok tényleges lefuttatása nélkül előre jelezni, és mivel egyetlen szimulátor sem működhet gyorsabban, mint maga a világegyetem, nem lehet megbízható módon előre jelezni az emberi döntéseket. Tehát még ha determináltak is a döntéseink, nem tudjuk előre megmondani, mik lesznek azok. Ez azonban nem teljes mértékben kielégítő vizsgálata a fogalomnak. Az előrejelezhetőség hiányára vonatkozó megállapítás a legtöbb fizikai folyamatra igaz – például arra, hogy le fog-e hullani egy porszem a földre. Ennélfogva ez a nézet egyenlőséget tesz az ember szabad akaratára és egy porszem véletlenszerű lehullása közé. És valóban úgy tűnik, hogy Wolfram ezen az állásponton van, amikor kijelenti, hogy az emberi agyban zajló folyamatok „funkcionálisan ekvivalensek” olyanokkal, mint amilyen például a folyadékok turbulenciája.

Bizonyos természeti jelenségeket (például a felhőket, a partvonalakat) a sejtautomatákhoz és a fraktálokhoz hasonló, ismétlődő, egyszerű folyamatok jellemeznek, ám az intelligens mintázatok (mint az emberi agy) megkövetelik az evolúciós folyamatot (vagy egy ilyen folyamat eredményeinek a visszafejtését). Az intelligencia az evolúció ihletett terméke, és egyben – szerintem – a világ leghatalmasabb „ereje”, amely végső soron meghaladja az öntudatlan természeti erőket.

Összességében Wolfram nagy ívű és ambiciózus értekezése vonzó, de végső soron túlhangsúlyozott és hiányos képet vázol fel. Wolfram azoknak a hangoknak az egyre növekvő csoportjához csatlakozik, akik azt állítják, hogy a valóság legalapvetőbb építőköveit nem pusztán az anyag és az energia alkotják, hanem információmintázatok. Wolfram azzal bővítette az ismereteinket, hogy az információmintázatok hogyan teremtik meg a világot, amit tapasztalunk, és már alig várom, hogy a kollégáival együttműködve robusztusabb látomást hozzassunk létre az algoritmusok mindenütt jelenvaló szerepéről a világban.

A 4. osztályú sejtautomaták előrejelezhetetlensége okozza a biológiai rendszerek látszólagos komplexitásának legalábbis egy részét, és valóban egy fontos biológiai paradigmát jelenít meg, amit utánozni próbálunk a technológiáinkkal. De nem magyarázza a biológia egészét. Mindazonáltal legalábbis lehetséges marad, hogy az ilyen módszerekkel utóbb magyarázatot adjunk a fizika egészére. Ha Wolframnak, vagy valaki másnak sikerül a sejtautomaták működésével és mintázataival leírnia a fizikát, akkor Wolfram könyve méltó lesz a címéhez. Akárhogy alakuljon is, a könyvét fontos ontológiai műnek tartom.

[\[109\]](#) A 110-es szabály a következő: egy sejt fehér lesz, ha az előző állapotban a saját és két szomszédja mind fekete vagy mind fehér volt, vagy ha az előző színe fehér volt, és a két szomszédja közül az egyik fekete, a másik fehér; minden egyéb esetben a sejt fekete lesz.

[\[110\]](#) Wolfram, New Kind of Science, 4. o., <http://www.wolframscience.com/nkonline/page-4-text>.

[\[111\]](#) Jegyezzük meg, hogy a kvantummechanika bizonyos értelmezéseiből az következik, hogy a világ nem determinisztikus szabályokon alapul, és a fizikai valóság (parányi) kvantumos skáláján minden kölcsönhatás eredendően kvantumos véletlenszerűséget mutat.

[\[112\]](#) Ahogyan azt fentebb, az [\[100\]](#) jegyzetben tárgyaltuk, a tömörítetlen genom körülbelül hatmilliárd bit információt tartalmaz (nagyságrendileg 10^{10} bitet), a tömörített genom pedig 30–100 millió byte-ot. A felépítési információ egy része természetesen más szervekre vonatkozik. Még ha feltételezzük is, hogy mind a 100 millió byte az agyra vonatkozik, a 10^9 bit, konzervatívan magas értéket kapjuk az agy leírására a genomban. A harmadik fejezetben említék egy becslést „az emberi memóriára az egyes idegsejtek közötti kapcsolatok szintjén”, beleértve „a kapcsolatok mintázatát és az ingerületátvivő anyagok koncentrációját is”. Ez a becslés egy felnőtt agyra nézve 10^{18} (milliárdszor milliárd) bit. Ez körülbelül egymilliárdszor (10^9) több információ, mint amennyi a genomnak az agy felépítését leíró részében található. A növekmény az agy önszerveződéséből fakad, ahogy kölcsönhatásba kerül a személy környezetével.

[\[113\]](#) Lásd a The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence (A spirituális gépek kora: amikor a számítógépek meghaladják az emberi intelligenciát), (New York: Viking, 1999) című könyvem „Disorder” („Rendezetlen rendezetlenség”) és „The Law of Increasing Entropy Versus the Growth of Order” („A növekvő entrópia törvénye szemben a rendezettség növekedésével”) című szakaszait, 30–33. o.

[\[114\]](#) Egy univerzális számítógép inputként el tudja fogadni bármilyen más számítógép definícióját, majd képes szimulálni azt a számítógépet. Ez önmagában még nem mond semmit a szimuláció sebességéről, ami akár nagyon alacsony is lehet.

[\[115\]](#) C. Geoffrey Woods: Crossing the Midline. („A felezővonal átlépése”) Science 304.5676 (2004. június 4.) 1455–56. o.; Stephen Matthews: Early Programming of the Hypothalamo-Pituitary-Adrenal Axis. („A hipotalamusz-hipofízis-adrenalin tengely korai programozása”) Trends in Endocrinology and Metabolism 13.9 (2002. november 1.) 373–80. o.; Justin Crowley és Lawrence Katz: Early Development of Ocular Dominance Columns. Science 290.5495 (2000. november 17.): 1321–24. o.; Anna Penn et al.: Competition in the Retinogeniculate Patterning Driven by Spontaneous Activity. Science 279.5359 (1998. március 27.): 2108–12. o.

[\[116\]](#) Egy Turing-gép hét lehetséges parancsa a következő: (1) olvass a szalagról, (2) tekerd a kazettát balra, (3) tekerd a kazettát jobbra, (4) írd 0-t a szalagra, (5) írd 1-et a szalagra, (6) ugorj másik parancsra és (7) állj.

[\[117\]](#) Wolfram, könyve talán legbámulatosabb elemzésében, bemutatja, hogyan lehet egy Turing-gép mindössze két állapottal és öt lehetséges színnel univerzális Turing-gép. Negyven évig azt hittük, hogy az univerzális Turing-gépnek ennél sokkal bonyolultabbnak kell lennie. Wolfram azt is bámulatos módon bizonyítja, hogy a 110-es szabály képes az univerzális számításra, a megfelelő szoftverrel. Természetesen az univerzális számítás önmagában nem képes hasznos feladatok elvégzésére megfelelő szoftver nélkül.

{118} A „nor” kapu két bemenetet alakít át egy kimenetté. A „nor” kimenete akkor és csak akkor igaz, ha sem A, sem B nem igaz.

{119} Lásd a The Age of Intelligent Machines (Az intelligens gépek kora), (Cambridge: MIT Press, 1989) című könyvem „A nor B: The Basis of Intelligence?” („A nor B: az intelligencia alapja?” című részét, 152–157. o., <http://www.kurzweilai.net/the-age-of-intelligent-machines-a-nor-b-the-basis-of-intelligence>.

{120} Az ENSZ Ázsiai és Csendes-óceáni Gazdasági és Szociális Bizottsága: Regional Road Map Towards an Information Society in Asia and the Pacific. („Az ázsiai és csendes-óceáni információs társadalmak kialakulásának regionális terve”), ST/ESCAP/2283, <http://www.unescap.org/publications/detail.asp?id=771>; Nyugat-Ázsiai Gazdasági és Szociális Bizottság: Regional Profile of the Information Society in Western Asia. („A nyugat-ázsiai információs társadalom regionális profilja”), 2003. október 8., <http://css.escwa.org.lb/SD/0977/b2.pdf>; John Enger: Asia in the Global Information Economy: The Rise of Region-States, The Role of Telecommunications. („Ázsia a globális információs gazdaságban: a régióállamok kialakulása, a telekommunikáció szerepe”) Előadás a „Kínai és Ázsiai Régiók Műholdas és Kábeltelevíziózása” c. nemzetközi konferencián, Communication Arts Research Institute, Fu Jen Catholic University, 1996. június 4–6.

{121} Lásd The 3 by 5 Initiative. („A 3×5 kezdeményezés”), Fact Sheet 274, 2003. december, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/2003/fs274/en/print.html>.

{122} Az 1998-as kockázatitőke-befektetések (10,1 milliárd dollár) 76 százaléka technológiai befektetés volt (PricewaterhouseCoopers sajtóközlemény, „Venture Capital Investments Rise 24 Percent and Set Record at \$14.7 Billion, PricewaterhouseCoopers Finds”, 1999. február 16.). 1999-ben a technológia-alapú vállalatok a kockázatitőke-befektetések (32 milliárd dollár) kilencven százalékát kapták meg (PricewaterhouseCoopers sajtóközlemény, „Venture Funding Explosion Continues: Annual and Quarterly Investment Records Smashed, According to PricewaterhouseCoopers Money Tree National Survey”, 2000. február 14.). A high-tech recessziója idején kétségtelenül csökkentek a kockázatitőke-befektetések, ám 2003 második negyedévében csak a szoftvercégek közel 1 milliárd dollárnyi tőkét vonzottak be (PricewaterhouseCoopers sajtóközlemény, „Venture Capital Investments Stabilize in Q2 2003”, 2003. július 29.). 1974-ben az Egyesült Államok teljes termelő ágazatában negyvenkét vállalat szerzett összesen 26,4 milliárd dollár kockázati tőkét (1974-es árfolyamon, 1992-es árfolyamon ez 81 milliárd dollár). Samuel Kortum és Josh Lerner, „Assessing the Contribution of Venture Capital to Innovation”, („A kockázati tőke hozzájárulása az innovációhoz”), RAND Journal of Economics 31.4 (2000 tél): 674–92. o., http://econ.bu.edu/kortum/rje_Winter'00_Kortum.pdf. Ahogyan Paul és Josh Lerner megfogalmazta, „Az 1970-es évek közepén a kockázatitőke-alapok bevételei gyakorlatilag a nulláról robbantak ki...” Gompers és Lerner, The Venture Capital Cycle (A kockázati tőke körforgása), (Cambridge: MIT Press, 1999). Lásd még: Paul Gompers, „Venture Capital” („Kockázati tőke”), in B. Espen Eckbo, szerk., Handbook of Corporate Finance: Empirical Corporate Finance, a Handbooks in Finance sorozatban (Holland: Elsevier, megjelenés előtt), 11. fejezet, 2005.

{123} Egy beszámoló arról, hogyan alakítják át az „új gazdaság” technológiái a „régiz gazdaságot”: Jonathan Rauch, „The New Old Economy: Oil, Computers, and the Reinvention of Earth” („Az új régi gazdaság: olaj, számítógépek és a föld újrafeltalálása”), Atlantic Monthly, 2001. január 3.

{124} U.S. Kereskedelmi Minisztérium, Bureau of Economic Analysis (<http://www.bea.doc.gov>).

{125} U.S. Kereskedelmi Minisztérium, Bureau of Economic Analysis, <http://www.bea.doc.gov>. Adatok 1920–1999-re: Population Estimates Program, Population Division, U.S. Census Bureau, „Historical National Population Estimates: July 1, 1900 to July 1, 1999” („Történelmi országos népességbecslések: 1900. július 1-től 1999. július 1-ig), <http://www.census.gov/population/estimates/nation/popclockest.txt>; adatok 2000–2004-re: <http://www.census.gov/popest/data/historical/index.html>.

{126} „The Global Economy: From Recovery to Expansion”, Results from Global Economic Prospects 2005: Trade, Regionalism and Prosperity (World Bank, 2004), <http://globaloutlook.worldbank.org/globaloutlook/outside/globalgrowth.aspx>; „World Bank: 2004 Economic Growth Lifts Millions from Poverty”, Voice of America News, <http://www.voanews.com/content/a-13-2004-11-17-voa41-67331222/382146.html>.

{127} Mark Bils és Peter Klenow, „The Acceleration in Variety Growth” („A változatosság növekedésének gyorsulása”), American Economic Review 91.2 (2001. május): 274–80. o. <http://www.klenow.com/Acceleration.pdf>.

{128} Lásd cxxvii, cxxix és cxxx jegyzetek.

{129} U.S. Munkaügyi Minisztérium, Bureau of Labor Statistics, sajtóközlemény, 2004. június 3. A <http://www.bls.gov/bls/productivity.htm> címen termelékenységjelentéseket tudunk generáltatni.

{130} Bureau of Labor Statistics, Major Sector Multifactor Productivity Index, Manufacturing Sector: Output per Hour All Persons (1996=100), <http://data.bls.gov/PDQ/outside.jsp?survey=mp> (Java szükséges: válasszuk a „Manufacturing” és „Output Per Hour All Persons” opciókat és 1949-et kezdő évnél), vagy <http://data.bls.gov/cgi-bin/srgate> (használjuk az „MPU300001” „AllYears” és Format 2 lehetőségeket) (kezdőoldal: <http://www.bls.gov/data/#productivity>)

[131] George M. Scalise, Semiconductor Industry Association, in „Luncheon Address: The Industry Perspective on Semiconductors,” 2004 Productivity and Cyclicalities in Semiconductors: Trends, Implications, and Questions—Report of a Symposium (2004) (National Academies Press, 2004), 40. o., <http://www.nap.edu/openbook/0309092744/html/index.html>.

[132] A Kurzweil Applied Intelligence adatai, jelenleg a ScanSoft (a korábbi Kurzweil Computer Products) része.

[133] eMarketer, „E-Business in 2003: How the Internet Is Transforming Companies, Industries, and the Economy – a Review in Numbers”, 2003. február; „US B2C E-Commerce to Top \$90 Billion in 2003”, 2003. április 30.; és „Worldwide B2B E-Commerce to Surpass \$1 Trillion By Year’s End”, 2003. március 19.

[134] A táblázatban feltüntetett szabadalmak, ahogy az amerikai Szabványügyi Hivatal leírja, „találmányi szabadalmak”, avagy „használati” szabadalmak. The U.S. Patent and Trademark Office, Table of Annual U.S. Patent Activity, http://www.uspto.gov/web/offices/ac/ido/oeip/taf/h_counts.htm.

[135] Az IT piaci részesedése megduplázódásának az ideje 23 év. U.S. Kereskedelmi Minisztérium, Economics and Statistics Administration, „The Emerging Digital Economy”, 2. ábra, http://www.esa.doc.gov/sites/default/files/reports/documents/emergingdig_0.pdf.

[136] Az amerikai oktatásban az egy főre jutó költségek megduplázódásának az ideje 23 év. National Center for Education Statistics, Digest of Education Statistics, 2002, <http://nces.ed.gov/pubs2003/digest02/tables/dt030.asp>.

[137] Az ENSZ becslése szerint a teljes globális részvénytőke értéke 2000-ben harminchéttárilliárd dollár volt. United Nations, „Global Finance Profile”, Report of the High-Level Panel of Financing for Development, 2001. június, <http://www.un.org/reports/financing/profile.htm>.

Ha arra számítanánk, hogy a jövőbeli növekedési sebessége nőni fog (szemben a jelenlegi elvárásokkal), akár csak 2 százalékkal, és évi 6 százalékos értékcsökkenéssel számolunk (mai értékre visszaszámítva a jövőbelieket), akkor húsz év távlatából felmérve a növekményezett és értékcsökkent növekedést, a mai értékek megháromszorozódnának. Ahogyan a következő párbeszédéből kiderül, ez az elemzés nem veszi számításba az értékcsökkenés valószínűsíthető növekedését, ami épp a jövőbeli növekedési elvárások felfokozódásából következne.

[138] Gordon E. Moore, „Cramming More Components onto Integrated Circuits” („Egyre több alkatrész az integrált áramkörökön”), Electronics 38.8 (1965. április 19.): 114–17. o., <http://www.cs.utexas.edu/~fussell/courses/cs352h/papers/moore.pdf>.

[139] Moore előrejelzése ebben az 1965-ben írt cikkben az volt, hogy az alkatrészek száma minden évben meg fog duplázódni. 1975-ben két évre módosította ezt az időtartamot. Mindazonáltal ez az ár–teljesítmény-arány tekintetében a kétszeresénél nagyobb javulást jelent, mivel a kisebb alkatrészek gyorsabban működnek (kisebb utat kell megtenniük az elektronoknak). A teljes ár–teljesítmény-arány (egy tranzistor-órajelciklusra vetítve) tehát körülbelül tizenhárom havonta feleződik.

[140] Paolo Gargini idézi Ann Steffora Mutschler, „Moore’s Law Here to Stay” („Moore törvénye érvényben marad”), ElectronicsWeekly.com, 2004. július, <http://www.electronicsworld.co.uk/articles/article.asp?liArticleID=36829>. Lásd még Tom Krazit, „Intel Prepares for Next 20 Years of Chip Making”, („Az Intel felkészül a chipgyártás következő húsz évére”), Computerworld, 2004. október 25., <http://www.edn.com/electronics-news/4334937/Intel-Moore-s-Law-Here-to-Stay>.

[141] Michael Kanellos, „High-rise’ Chips Sneak on Market” („A ’többrétegű’ chippek belopakodnak a piacra”), CNET News.com, 2004. július 13., http://news.cnet.com/High-rise-chips-sneak-on-market/2100-1006_3-5267738.html.

[142] Benjamin Fulford, „Chipmakers Are Running Out of Room: The Answer Might Lie in 3-D” („A chipgyártók kifogynak a helyből: a megoldás a 3 dimenzió lehet”), Forbes.com, 2002. július 22., http://www.forbes.com/forbes/2002/0722/173_print.html.

[143] NTT-sajtóközlemény, „Three-Dimensional Nanofabrication Using Electron Beam Lithography” („Háromdimenziós nanogyártás elektronnyaláb-litográfiával”), 2004. február 2., <http://www.ntt.co.jp/news/news04e/0402/040202.html>.

[144] László Forró és Christian Schönenberger, „Carbon Nanotubes, Materials for the Future” („Szén nanocsövek, a jövő anyagai”), Europhysics News 32.3 (2001), <http://www.europhysicsnews.com/>. A nanocsövek áttekintését illetően lásd még <http://domino.research.ibm.com/comm/research.nsf/pages/r.nanotech.html>.

[145] Michael Bernstein, American Chemical Society sajtóközlemény, „High-Speed Nanotube Transistors Could Lead to Better Cell Phones, Faster Computers” („A nagy sebességű nanocső-tranzisztorok jobb mobiltelefonokat és gyorsabb számítógépeket tehetnek lehetővé”), 2004. április 27., http://www.eurekalert.org/pub_releases/2004-04/acs-nt042704.php.

[146] Becslésem szerint egy nanocsőalapú tranzisztor, illetve a kiegészítő áramkörei és a kapcsolódásai körülbelül egy tíz nanométeres kockában férnének el (maga a tranzisztor ennek csak a töredéke), vagyis 10^{-3} köbnanométerben. Ez konzervatív becslés, mivel az egyrétegű nanocsövek átmérője mindössze egy nanométer. Egy centiméter = 10^7 nanométer. Tehát egy egykőbcentis kocka = 10^{21} köbnanométer. Azaz egy egykőbcentis kockában 10^{18} tranzisztor fér el. Ha egy számítógéphez körülbelül 10^7 tranzisztor kell (mely sokkal bonyolultabb eszköz, mint ami az emberi idegsejtek közötti kapcsolatokban végzi a számításokat), akkor körülbelül 10^{11} (százmilliárd) párhuzamos számítógépet tudunk létrehozni ebben a kockában.

Ha egy nanocsőalapú számítógép másodpercenként 10^{12} számítást tud elvégezni (Burke becslése alapján), akkor egy egykőbcentis nanocsőegység sebessége 10^{23} számítás per másodpercre tehető. Lásd még Bernstein, „High-Speed Nanotube Transistors” („Nagy sebességű nanocső-tranzisztorok”).

Ha az emberi agy funkcionális emulálásához 10^{16} számításra van szükség másodpercenként (lásd a fejezet későbbi részében), akkor a fenti egykőbcentis kocka körülbelül 10 millió (10^7) emberi agynak felel meg. Ha a konzervatívabb 10^{19} számítás per másodperccel számolunk a neuromorfikus szimulációhoz (ami az összes neurális alkotóelem összes nem linearitását is szimulálja, lásd a fejezetben később), akkor az egykőbcentis nanocső áramköri egysége mindössze tízezer emberi agynak megfelelő teljesítményt nyújt.

[147] „Mindössze tíz éve mértünk először bármiféle elektromos átvitelt egy nanocsőben. Most azt kutatjuk, mit lehet és mit nem lehet megcsinálni az egymolekulás eszközökkel. A következő lépés annak a végiggondolása lesz, hogyan alkossunk az egyes elemekből összetett áramköröket”, mondja Cees Dekker, lásd Henk W. Ch. Postma et al., „Carbon Nanotube Single-Electron Transistors at Room Temperature” („Szén nanocső egyelektronos tranzisztorok szobahőmérsékleten”), Science 293.5527 (2001. július 6.): 76–129. o. A cikket az American Association for the Advancement of Science sajtóközlemény ismerteti, „Nano-transistor Switches with Just One Electron May Be Ideal for Molecular Computers, Science Study Shows” („A Science tanulmánya szerint az egyelektronos nanotranzisztor-kapcsolók ideálisak lehetnek a molekuláris számítógépekhez”), http://www.eurekalert.org/pub_releases/2001-07/aافت-nsw062901.php.

[148] Az IBM kutatói megoldották a nanocsőgyártás egyik problémáját. Amikor a szénkormot felhevítik, hogy létrehozzák a csöveket, nagyszámú, nem használható fémcső is keletkezik a tranzisztorokhoz szükséges félvezetőcsövek mellett. A kutatócsoport mindkét fajta csövet beépítette egy áramkörbe, majd elektromos impulzusokkal szétzúzta a nemkívánatosakat – ami sokkal hatékonyabb eljárásnak bizonyult, mint az, hogy egyesével, atomi szintű mikroszkóppal válogassák ki a kívánatos csöveket. Mark K. Anderson, „Mega Steps Toward the Nanochip” („Óriási lépések a nanochip felé”), Wired News, 2001. április 27., <http://www.wired.com/news/technology/0,1282,43324,00.html>, hivatkozva Philip G. Collins, Michael S. Arnold és Phaeton Avouris, „Engineering Carbon Nanotubes and Nanotube Circuits Using Electrical Breakdown” („Szén nanocsővek és nanocső-áramkörök gyártása elektromos lebontással”) című cikkét, Science 292.5517 (2001. április 27., 2001): 706–9. o.

[149] „Egy szén nanocső, amely atomi szinten vizsgálva úgy néz ki, mint a feltekert csirkeháló, több ezerszer vékonyabb, mint egy emberi hajszál, mégis nagyon erős.” A Kaliforniai Egyetem sajtóközleménye, „Researchers Create First Ever Integrated Silicon Circuit with Nanotube Transistors” („Kutatók megalkották az első, nanocső-tranzisztorokból álló integrált szilícium áramkört”), 2004. január 5., http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2004/01/05_nano.shtml, hivatkozva Yu-Chih Tseng et al., „Monolithic Integration of Carbon Nanotube Devices with Silicon MOS Technology” („Szén nanocső-eszközök monolitikus integrációja szilícium MOS technológiával”), Nano Letters 4.1 (2004): 123–27. o., <http://pubs.acs.org/>.

[150] R. Colin Johnson, „IBM Nanotubes May Enable Molecular-Scale Chips” („Az IBM nanocsővei megnyithatják az utat a molekuláris nagyságú chippek előtt”), EETimes, 2001. április 26., <http://www.eetimes.com/electronics-news/4100808/IBM-nanotubes-may-enable-molecular-scale-chips>.

[151] Avi Aviram és Mark A. Ratner, „Molecular Rectifiers” („Molekuláris egyenirányítók”), Chemical Physics Letters (1974. november 15.): 277–83. o., hivatkozva Charles M. Lieber, „The Incredible Shrinking Circuit” („A hihetetlenül zsugorodó áramkör”), Scientific American (2001. szeptember). Az Aviram és Ratner által bemutatott, egy molekulából álló egyenirányító tetszőlegesen képes bármelyik kívánt irányban átengedni az elektronokat.

[152] Will Knight, „Single Atom Memory Device Stores Data” („Adatot tárol az egyatomos memóriaszköz”), NewScientist.com, 2002. szeptember 10., <http://www.newscientist.com/article/dn2775-single-atom-memory-device-stores-data.html>, hivatkozva R. Bennowitz et al., „Atomic Scale Memory at a Silicon Surface” („Atomszintű memória egy szilíciumfelszínen”), Nanotechnology 13 (2002. július 4.): 499–502. o.

[153] A tranzisztoruk indium-foszfidból és indium-gallium-arszenidből készült. Illinois-i Egyetem (Urbana-Champaign) sajtóközlemény, „Illinois Researchers Create World's Fastest Transistor – Again” (Ismét illinois-i kutatók hozták létre a világ leggyorsabb tranzisztorát”), http://www.eurekalert.org/pub_releases/2003-11/uoiarc110703.php.

[154] Michael R. Diehl et al., „Self-Assembled Deterministic Carbon Nanotube Wiring Networks” („Önösszeszerelő determinisztikus nanocső-vezetékhalózatok”), Angewandte Chemie International Edition 41.2 (2002): 353–56. o.; C. P. Collier et al., „Electronically Configurable Molecular-Based Logic Gates” („Elektronikusan konfigurálható, molekuláris alapú logikai kapuk”), Science 285.5426 (1999. július): 391–94. o. Lásd: <http://www.sciencemag.org/site/feature/data/1039735.xhtml>.

[155] A Purdue teamje által tervezett „rozettás nanocsővek” szénből, nitrogénből, hidrogénből és oxigénből állnak. A rozetták önrendezőek, mivel belsejük hidrofób, a külsejük pedig hidrophil, s így, hogy távol tartsák a belsejüket a víztől, nanocsővekké hajlanak. „Egy új módszer révén immár szinte tetszés szerint képesek vagyunk megváltoztatni a rozettás nanocsőveink fizikai és kémiai tulajdonságait”, állítja Hicham Fenniri kutatásvezető. R. Colin Johnson, „Purdue Researchers Build Made-to-Order Nanotubes” („A Purdue kutatói rendelésre készült nanocsőveket építenek”), EETimes, 2002. október 24., <http://www.eetimes.com/article/showArticle.jhtml?articleId=18307660>; H. Fenniri et al., „Entropically Driven Self-Assembly of Multichannel Rosette Nanotubes” („Többszatornás rozettás nanocsővek entropikusan vezérelt önszerveződése”), Proceedings of the National Academy of Sciences 99, 2. kieg. Kötet (2002. április 30.): 6487–92. o.; Purdue sajtóközlemény, „Adaptable Nanotubes Make Way for Custom-Built Structures, Wires” („A módosítható

nanocsövek megnyitják az utat az egyedi tervezésű szerkezetek és vezetékek előtt”), <http://news.uns.purdue.edu/UNS/html4ever/020311.Fenniri.scaffold.html>.

Hasonló munkát végeztek holland tudósok: Gaia Vince, „Nano-Transistor Self-Assembles Using Biology” („Biológiai elven működő önrendező nanotranzisztor”), NewScientist.com, 2003. November 20., <http://www.newscientist.com/article/dn4406-nanotransistor-selfassembles-using-biology.html>.

[156] Liz Kalaugher, „Lithography Makes a Connection for Nanowire Devices” („Nanohuzalozású eszközök összekapcsolása litográfiával”), 2004. június 9., <http://www.nanotechweb.org/articles/news/3/6/6/1>, hivatkozva Song Jin et al., „Scalable Interconnection and Integration of Nanowire Devices Without Registration” („Nanohuzalozású eszközök jelölés nélküli, skálázható összekapcsolása és integrálása”), Nano Letters 4.5 (2004): 915–19. o.

[157] Chao Li et al., „Multilevel Memory Based on Molecular Devices” („Többszintű, molekuláris eszközökön alapuló memória”), Applied Physics Letters 84.11 (2004. március 15.): 1949–51. o. . Lásd még: <http://nanolab.usc.edu/>.

[158] Gary Stix, „Nano Patterning” („Nanomintázatok”), Scientific American (2004. február 9.), <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=nano-patterning>; Michael Kanellos, „IBM Gets Chip Circuits to Draw Themselves” („Az IBM önmagukat megrajzoló chipáramköröi”), CNET News.com, http://news.cnet.com/IBM-gets-chip-circuits-to-draw-themselves/2100-1008_3-5114066.html.

[159] Az IBM olyan chipeken dolgozik, amelyeket szükség szerint átkonfigurálják magukat, például megnövelik a memóriájukat, vagy gyorsítókát iktatnak be. „A jövőben előfordulhat, hogy nem olyan chipet fogunk használni, amelyet vettünk”, mondja Bernard Meyerson, az IBM Systems and Technology Group fő tervezője. IBM sajtóközlemény, „IBM Plans Industry’s First Openly Customizable Microprocessor” („Az IBM az iparág első teljesen testreszabható mikroprocesszorát tervezi”), <http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/6928.wss>.

[160] BBC News, „Nanowire’ Breakthrough Hailed” („Üdvözljük a »nanohuzak« áttörést”), 2003. április 1., <http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/2906621.stm>. Thomas Scheibel et al., „Conducting Nanowires Built by Controlled Self-Assembly of Amyloid Fibers and Selective Metal Deposition” („Amiloid szálak és szelektív fémfelhordás irányított önszervezése révén épített vezető nanohuzalok”), Proceedings of the National Academy of Sciences 100.8 (2003. április 15.): 4527–32. o., online megjelent 2003. április 2., <http://www.pnas.org/cgi/content/full/100/8/4527>.

[161] Duke Egyetem sajtóközlemény, „Duke Scientists ‘Program’ DNA Molecules to Self Assemble into Patterned Nanostructures” („A Duke tudósai DNS-molekulákat »programoznak«, hogy adott mintájú nanoszerkezetekké szerveződjenek”), http://www.eurekalert.org/pub_releases/2003-09/du-ds092403.php, hivatkozva Hao Yan et al., „DNA-Templated Self-Assembly of Protein Arrays and Highly Conductive Nanowires” („Fehérjesorok és jól vezető nanohuzalok DNS-sablonú önszerveződése”), Science 301.5641 (2003. szeptember 26.): 1882–1884. o. Lásd még http://www.phy.duke.edu/~gleb/Pdf_FILES/DNA_science.pdf.

[162] Ibid.

[163] Íme egy példa az utazóügynök-probléma megoldására: egy hipotetikus utazó számára próbálunk optimális útvonalat találni több város között úgy, hogy minden várost csak egyszer érintsen. Az utak csak bizonyos várospárokat kötnek össze, tehát a helyes útvonal megtalálása korántsem evidens.

Az utazóügynök-probléma megoldásához Leonard Adleman, a Dél-Kaliforniai Egyetem matematikusa a következő lépéseket hajtotta végre:

1. Minden városhoz rendeljünk egy egyedi kódot, és generáljuk le a neki megfelelő kis DNS-szakaszt.
2. PCR révén hozzunk létre billiónyi másolatot minden ilyen szakaszból.
3. Ezután öntsük össze az így létrehozott DNS-szakaszokat egy kémcsőbe. Ez a lépés arra épít, hogy a DNS-szakaszok igyekeznek összekapcsolódni, és automatikusan hosszabb szakaszok jönnek létre. Mindegyik hosszabb szakasz egy lehetséges útvonalat jelent a városok között. A várospárok közötti útvonalakat képviselő rövidebb szakaszok véletlenszerűen kapcsolódnak össze, tehát nem lehet százszázalékos biztonsággal kijelenteni, hogy létrejön a helyes választ (a városok sorrendjét) tartalmazó hosszabb szakasz is. Ugyanakkor olyan sok másolatunk van, hogy gyakorlatilag biztos, hogy legalább egy – és valószínűleg több millió – olyan szakasz létrejön, amely a helyes választ tartalmazza.

A következő lépések speciálisan tervezett enzimeket használnak szintén létrejövő, több billió, hibás választ képviselő szálak megsemmisítésére, csak a helyes választ tartalmazó szálakat meghagyva.

4. Használjunk „primereknek” nevezett molekulákat azoknak a DNS-szakaszoknak a megsemmisítésére, amelyek nem a kiinduló várossal kezdődnek, illetve azokéra, amelyek nem az utolsó várossal végződnek, majd PCR alkalmazásával sokszorozítsuk a megmaradt szakaszokat.

5. Használjunk egy enzimreakciót azoknak a DNS-szakaszoknak az elpusztítására, amelyek a városok számánál hosszabb útvonalat jelölnek.

6. Használjunk egy enzimreakciót azoknak a szakaszoknak az elpusztítására, amelyek nem tartalmazzák az első várost. Ismételjük

meg az eljárást minden városra.

7. Most mindegyik megmaradt szakasz egy helyes választ jelöl. PCR alkalmazásával sokszorozósuk ezeket a szakaszokat, amíg több milliárd nem lesz belőlük.

8. Az elektroforézis nevű eljárással olvassuk ki a helyes szakaszok DNS-szekvenciáját. Az eredmény úgy néz ki, mint vonalkódok egy sorozata, mely a városok helyes sorrendjét jelöli.

Lásd L. M. Adleman, „Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems” („Molekuláris számítások kombinatorikai problémák megoldásaira”), Science 266 (1994): 1021–24. o.

[\[164\]](#) Charles Choi, „DNA Computer Sets Guinness Record” („A DNS-számítógép Guinness-rekordja”), http://www.upi.com/Science_News/2003/02/24/DNA-computer-sets-Guinness-record/UPI-73981046125509/. Lásd még Y. Benenson et al., „DNA Molecule Provides a Computing Machine with Both Data and Fuel” („A DNS-molekulából olyan számítógép építhető, ami tartalmazza az adatokat és a működéséhez szükséges energiát is”), Proceedings of the National Academy of Sciences 100.5 (2003. március 4.): 2191–96. o., <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?tool=pubmed&pubmedid=12601148>; Y. Benenson et al., „An Autonomous Molecular Computer for Logical Control of Gene Expression” („Egy önálló molekuláris számítógép a génexpresszió logikai vezérlésére”), Nature 429.6990 (May): 423–29. o. (online megjelent 2004. április 28-án), http://www.wisdom.weizmann.ac.il/~udi/papers/automoleculcomp_nat04.pdf.

[\[165\]](#) Stanford Egyetem sajtóközlemény, „Spintronics’ Could Enable a New Generation of Electronic Devices, Physicists Say” („A fizikusok szerint a »spintronika« az elektronikus eszközök új generációja előtt nyithatja meg az utat”), http://www.eurekalert.org/pub_releases/2003-08/su-ce080803.php, hivatkozva Shuichi Murakami, Naoto Nagaosa és Shoucheng Zhang, „Dissipationless Quantum Spin Current at Room Temperature” („Disszipációmentes kvantum spin áram szobahőmérsékleten”), Science 301.5638 (2003. szeptember 5.): 1348–51. o.

[\[166\]](#) Celeste Biever, „Silicon-Based Magnets Boost Spintronics” („A szilíciumalapú mágnesek lökést adnak a spintronikának”), NewScientist.com, 2004. március 22., <http://www.newscientist.com/article/dn4801-siliconbased-magnets-boost-spintronics.html>, hivatkozva Steve Pearton, „Silicon-Based Spintronics” („Szilikonalapú spintronika”), Nature Materials 3.4 (2004. április): 203–4. o.

[\[167\]](#) Will Knight, „Digital Image Stored in Single Molecule” („Egyetlen molekulában tárolt digitális kép”), NewScientist.com, 2002. december 1., <http://www.newscientist.com/article/dn3129-digital-image-stored-in-single-molecule.html>, hivatkozva Anatoly K. Khitrin, Vladimir L. Ermakov és B. M. Fung, „Nuclear Magnetic Resonance Molecular Photography” („Mágneses rezonancia molekuláris fotográfia”), Journal of Chemical Physics 117.15 (2002. október 15.): 6903–6. o.

[\[168\]](#) Reuters, „Processing at the Speed of Light” („Adatfeldolgozás fénysebességgel”), Wired News, <http://www.wired.com/news/technology/0,1282,61009,00.html>.

[\[169\]](#) Napjainkban a legnagyobb faktorálható szám 512 bitből áll, az RSA Security szerint.

[\[170\]](#) Stephan Gulde et al., „Implementation of the Deutsch-Jozsa Algorithm on an Ion-Trap Quantum Computer” („A Deutsch-Jozsa-algoritmus implementálása egy ionsapda-kvantumszámítógépen”), Nature 421 (2003. január 2.): 48–50. o. Lásd: http://heart-c704.uibk.ac.at/publications/papers/nature03_gulde.pdf.

[\[171\]](#) Mivel jelenleg a számítás ár-teljesítmény-aránya évente a kétszeresére javul, ezerszeres javuláshoz kb. tíz kétszereződés, azaz tíz év kell. Azonban ha lassan is, de a kétszerezés ideje is csökken, ezért a tulajdonképpeni érték nyolc év.

[\[172\]](#) Az egymást követő ezerszeres javulások valamivel gyorsabban következnek be, lásd az előző jegyzetet.

[\[173\]](#) Hans Moravec, „Rise of the Robots” („A robotok felemelkedése”), Scientific American (1999. december): 124–35. o., <http://www.sciam.com> és <http://www.frc.ri.cmu.edu/~hpm/project.archive/robot.papers/1999/SciAm.scan.html>. Moravec a Carnegie Mellon Egyetem robotikai intézetének a professzora. Mobile Robot Laboratory projektjében azt kutatja, hogyan lehet kamerákkal, szonárokkal és egyéb érzékelőkkel háromdimenziós térbeli tudatossággal felruházni a robotokat. Az 1990-es években felvázolta a robotok egymást követő nemzedékeit, melyek „lényegében a mi leszármazottaink lesznek, ha nem is a szó hagyományos értelmében. Úgy vélem, végül önállóvá válnak, és olyan dolgokat fognak tudni csinálni, amilyeneket mi el sem tudunk képzelni és meg sem tudunk érteni – tudják, ahogy a gyerekek” (Nova Online interjú Hans Moravecvel, 1997. október, <http://www.pbs.org/wgbh/nova/robots/moravec.html>). Könyvei, a Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence (Az elme gyermekei: a robot- és emberi intelligencia jövője), (Cambridge: Harvard University Press, 1988) és a Robot: Mere Machine to Transcendent Mind (Robot: a pusztá géptől a transzcendentális tudatig), (New York: Oxford University Press, 1999) a jelenlegi és a jövőbeli robotnemzedékek képességeit tárja fel.

Megjegyzés: A szerző Moravec robotikai cégének, a Seegridnek az egyik befektetője és az igazgatótanács tagja.

[\[174\]](#) Noha a másodpercenként végrehajtott műveletek száma, ahogy Moravec használja a fogalmat, illetve a másodpercenként végrehajtott számítások száma kissé eltérő fogalmak, a nagyságrendi becslések szempontjából elég közel állnak egymáshoz. Moravec a biológiai modellektől független matematikai eljárást dolgozott ki a robotjai látásához, ám az eljárás kidolgozása után kiderült, hogy Moravec algoritmusai és a biológiai algoritmusok nagyon hasonlóak egymáshoz. Funkcionális szempontból Moravec számításai ugyanazt csinálják, mint ezek az idegi területek, tehát a Moravec algoritmusain alapuló számítási becslések segítségével meghatározhatjuk, hogy mi

szükséges a funkcionálisan azonos transzformációk megvalósításához.

[175] Lloyd Watts, „Event-Driven Simulation of Networks of Spiking Neurons” („Tüzelő neuronokból álló hálózatok eseményvezérelt szimulációja”), 7. Neural Information Processing Systems Foundation Conference, 1993; LloydWatts, „The Mode-Coupling Liouville-Green Approximation for a Two-Dimensional Cochlear Model”, Journal of the Acoustical Society of America 108.5 (2000. november): 2266–71. o. Watts az Audience Inc. alapítója, amely cég az emberi hallórendszer régióiról készített funkcionális szimulációknak a hangfeldolgozó alkalmazásokban való felhasználásával foglalkozik, többek között a hang előfeldolgozásával az automata beszédfelismerő rendszerekben. További információkért lásd: <http://www.lloydwatts.com/neuroscience.shtml>.

Megjegyzés: A szerző az Audience Inc. tanácsadója.

[176] U.S. Patent Application 20030095667, U.S. Patent and Trademark Office, 2003. május 22.

[177] A Medtronic MiniMed zárt hurkú mesterséges hasnyálmirigye jelenleg az emberi klinikai tesztelés fázisában van, és biztató eredményeket mutat. A cég bejelentette, hogy az eszköz öt éven belül piacra kerül. Medtronic sajtóközlemény, „Medtronic Supports Juvenile Diabetes Research Foundation’s Recognition of Artificial Pancreas as a Potential ‘Cure’ for Diabetes” (A Medtronic támogatja a Juvenile Diabetes Research Foundation által elismert mesterséges hasnyálmirigyet mint a diabétesz potenciális »gyógyítóeszközét«), 2004. március 23., <http://www.medtronic.com/>. Az ilyen eszközökhöz kell egy glükózezérkékelő, egy inzulinpumpa és egy automata visszacsatolási mechanizmus az inzulinszint figyeléséhez (International Hospital Federation, „Progress in Artificial Pancreas Development for Treating Diabetes” („Előrelépések a mesterséges hasnyálmirigy fejlesztésében a diabétesz kezeléséhez”). A Roche is versenyben van a mesterséges hasnyálmirigy 2007-ig való kifejlesztésében. Lásd: <http://www.roche.com/pages/downloads/science/pdf/rtdcmannh02-6.pdf>.

[178] Az egyes idegsejtek és az idegsejtek közötti kapcsolatok alapján számos modell és szimuláció készült. Tomaso Poggio így ír: „Az egyik nézet az idegsejtről az, hogy leginkább egy chiphez hasonlít, több ezer, a logikai kapuknak megfelelő funkcióval, nem pedig egyetlen küszöbérték-érzékelő elem”, Tomaso Poggio, magánbeszélgetés Ray Kurzweillel, 2005. január.

Lásd még T. Poggio és C. Koch, „Synapses That Compute Motion” („Mozgásszámító szinapszisok”), Scientific American 256 (1987): 46–52. o.

C. Koch és T. Poggio, „Biophysics of Computational Systems: Neurons, Synapses, and Membranes” („A számítási rendszerek biofizikája: idegsejtek, szinapszisok és membránok”), in Synaptic Function (Szinaptikus funkciók), G. M. Edelman, W. E. Gall és W. M. Cowan, szerk. (New York: John Wiley and Sons, 1987), 637–97. o.

További részletes, idegsejtszintű modelleket és szimulációkat alkotnak a Pennsylvanai Egyetem Neuroengineering Research Lab.-jában, idegsejtszinten visszafejtett agyi funkciók alapján. Dr. Leif Finkel, a laboratórium igazgatója elmondta: „jelenleg a vizuális cortex egy kis részének sejtszintű modelljén dolgozunk. Ez egy nagyon részletes számítógépes szimuláció, ami hozzávetőlegesen pontossággal tükrözi a valódi idegsejteknek legalább az alapvető műveleteit. [Kollégám, Kwabena Boahen] alkotott egy chipet, amely pontosan modellezi a retinát, és olyan kimeneti jeleket állít elő, amelyek erősen közelítik a valódi retina által adottakat”. Lásd <http://nanodot.org/>.

Az idegsejtszintű modellek és szimulációk áttekintéséből kiderül, hogy az egy-egy idegsejti tranzakcióra (egy tranzakció egy dendrit ingerület-továbbvitelét és nyugalmi helyzetbe kerülését jelenti) becsült 10^3 művelet ésszerű felső határ lehet. A legtöbb szimuláció ennél jóval kisebb értékkel dolgozik.

[179] A Blue Gene/L, Blue Gene számítógépek második generációjának a terveit 2001 végén jelentették be. Az új szuperszámítógép a tervek szerint tizenötször gyorsabb lesz, mint a mai szuperszámítógépek, ugyanakkor hússzor kisebb. Az IBM és a National Security Agency’s Lawrence Livermore Nemzeti Laboratórium együtt építi meg. 2002-ben az IBM bejelentette, hogy a nyílt forráskódú Linuxot választották ki az új szuperszámítógépek operációs rendszerül. 2003. júliusára elkezdték gyártani a szuperszámítógép új típusú processzorait, amelyek chipekre integrált teljes rendszerek. „A Blue Gene/L annak a plakátarca, hogy mit lehet létrehozni az egy chipre integrált teljes rendszer koncepcióval. A chip több mint kilencven százaléka a technológiai tárházunk standard elemeiből épül fel”, mondja Paul Coteus, a projekt egyik igazgatója (Timothy Morgan, „IBM’s Blue Gene/L Shows Off Minimalist Server Design” („Az IBM Blue Gene/L-je minimalista szerverdizájnt követ”), The Four Hundred hírlevél, <http://www.itjungle.com/tfh/tfh120103-story05.html>). 2004 júniusában a tíz legnagyobb szuperszámítógép listáján megjelentek a Blue Gene/L prototípusai. IBM-sajtóközlemény, „IBM Surges Past HP to Lead in Global Supercomputing” („Az IBM a HP-t megelőzve élre tört a globális szuperszámítógép-piacon”), <http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/22087.wss>.

[180] Ezt a fajta hálózatot gyakran peer-to-peer (P2P) hálózatnak is nevezik. Ebben a hálózatban minden csomópont kapcsolatban állhat az összes többivel, vagy azok egy részével, és az információ több lehetséges útvonalon is eljuthat egyik pontból a másikba. Ezek a hálózatok nagyon rugalmasak és önszervezőek. „A peer-to-peer hálózat legfontosabb jellemzője az, hogy nincs kitüntetett központi irányítóegység. Ehelyett mindegyik csomópont rendelkezik saját kommunikációs eszköztárral, és jeltovábbítóként viselkedik a többi csomópont szempontjából.” Sebastian Rupley, „Wireless: Mesh Networks” („Vezeték nélküli peer-to-peer hálózatok”), PC Magazine, 2003. július, <http://www.pcmag.com/article2/0,2817,1130864,00.asp>; Robert Poor, „Wireless Mesh Networks” („Vezetéknélküli peer-to-peer hálózatok”), Sensors Online, 2003. február, <http://www.sensorsmag.com/articles/0203/38/main.shtml>; Tomas Krag és Sebastian Buettrich, „Wireless Mesh Networking” („Vezeték nélküli peer-to-peer hálózatok”), O’Reilly Wireless DevCenter, 2003. január 22.

[181] Carver Mead, aki több mint huszonöt céget alapított, és több mint ötven szabadalmat jegyez, úttörő munkát végez a

neuromorfikus elektronikai rendszerek, az agy és az idegrendszer alapján modellezett áramkörök új területén. Lásd Carver A. Mead, „Neuromorphic Electronic Systems” („Neuromorfikus elektronikai rendszerek”), IEEE Proceedings 78.10 (1990. október): 1629–36. o. Az ő munkájának köszönhető a számítógépek tapipadja, illetve a digitális hallókészülékekben használt fülcsiga-chip. 1999-ben alapított cége, a Foveon analóg képérzékelőket gyárt, amelyek filmminőségű jelek előállítására alkalmasak.

[\[182\]](#) Edward Fredkin, „A Physicist’s Model of Computation” („Egy fizikus modellje a számítástechnikáról”), Proceedings of the Twenty-sixth Recontre de Moriond, Texts of Fundamental Symmetries (1991): 283–97. o., <http://www.physicsarchives.com/archivumphysicum/Physicistmodelcomputation.htm>.

[\[183\]](#) Gene Frantz, „Digital Signal Processing Trends” („Trendek a digitális jelfeldolgozásban”), IEEE Micro 20.6 (2000. november/december): 52–59. o.

[\[184\]](#) 2004-ben az Intel bejelentett egy „kilencven fokos fordulatot” a többmagos (egynél több processzor egy lapkán) architektúrák felé, miután beleütköztek a „hőmérsékleti falba” (vagy „teljesítményfalba”), amit az egyre gyorsabbá váló processzorok által termelt hő hozott létre.

[\[185\]](#) R. Landauer, „Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process” („Irreverzibilitás és hőtermelés a számítási folyamatban”), IBM Journal of Research Development 5 (1961): 183–91. o., <http://www.cs.duke.edu/~reif/courses/complectures/AltModelsComp/Landauer/Landauer.irreversibility.pdf>.

[\[186\]](#) Charles H. Bennett, „Logical Reversibility of Computation” („A számítás logikai reverzibilitása”), IBM Journal of Research Development 17 (1973): 525–32. o.; Charles H. Bennett, „The Thermodynamics of Computation – a Review” („A számítás termodinamikája – áttekintés”), International Journal of Theoretical Physics 21 (1982): 905–40. o.; Charles H. Bennett, „Demons, Engines, and the Second Law” („Démonok, motorok és a második törvény”), Scientific American 257 (1987. november): 108–16. o.

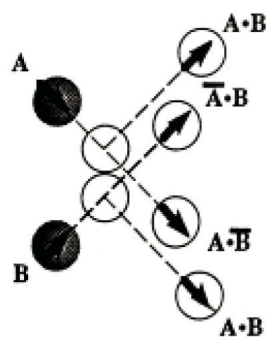
[\[187\]](#) Edward Fredkin és Tommaso Toffoli, „Conservative Logic” („Konzervatív logika”), International Journal of Theoretical Physics 21 (1982): 219–53. o., http://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall06/cos576/papers/fredkin_toffoli82.pdf. Edward Fredkin, „A Physicist’s Model of Computation” („Egy fizikus modellje a számítástechnikáról”), Proceedings of the Twenty-sixth Recontre de Moriond, Texts of Fundamental Symmetries (1991): 283–97. o., <http://www.physicsarchives.com/archivumphysicum/Physicistmodelcomputation.htm>.

[\[188\]](#) Knight, „Digital Image Stored in Single Molecule” („Egyetlen molekulában tárolt digitális kép”) hivatkozva Khitrin et al., „Nuclear Magnetic Resonance Molecular Photography” („Mágneses rezonancia molekuláris fotográfia”), lásd [\[152\]](#) jegyzet fentebb.

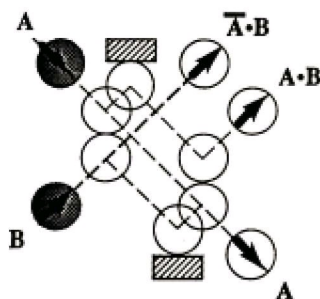
[\[189\]](#) Tízmilliárd (10^{10}) ember 10^{19} számítás per másodperccel összesen 10^{29} számítás per másodperc teljesítményt jelent az összes emberi agyra nézve; a 10^{42} számítás per másodperc tízbilliószor (10^{13} -szor) több ennél.

[\[190\]](#) Fredkin, „Physicist’s Model of Computation”, lásd a [\[182\]](#) és [\[187\]](#) jegyzeteket.

[\[191\]](#) Az egyik ilyen kapu az interakció-kapu, egy két bemenetű, négy kimenetű, univerzális, reverzibilis logikájú kapu:



és a Feynmann-kapu, egy két bemenetű, három kimenetű, reverzibilis, univerzális logikai kapu.



Mindkét kép az idézett mű 7. oldaláról származik.

[\[192\]](#) Uo., 8. o.

[\[193\]](#) C. L. Seitz et al., „Hot-Clock nMOS” („Hot-Clock nMOS”), Proceedings of the 1985 Chapel Hill Conference on VLSI (Rockville: Computer Science Press, 1985), 1–17. o.; Ralph C. Merkle, „Reversible Electronic Logic Using Switches” („Reverzibilis elektronikus logika kapcsolók használatával”), Nanotechnology 4 (1993): 21–40. o.; S. G. Younis és T. F. Knight, „Practical Implementation of Charge Recovering Asymptotic Zero Power CMOS” („A töltésvisszanyerő, aszimptotikusan nulla fogyasztású CMOS gyakorlati megvalósítása”), Proceedings of the 1993 Symposium on Integrated Systems (Cambridge: MIT Press, 1993), 234–50. o.

[\[194\]](#) Hiawatha Bray, „Your Next Battery” („A jövő akkumulátora”), Boston Globe, 2003. november 24., http://www.boston.com/business/technology/articles/2003/11/24/your_next_battery.

[\[195\]](#) Seth Lloyd, „Ultimate Physical Limits to Computation” („A számítás végső fizikai korlátja”), Nature 406 (2000): 1047–54. o.
A számítás korlátaival kapcsolatban úttörő munkát végzett Hans J. Bremermann 1962-ben: Hans J. Bremermann, „Optimization Through Evolution and Recombination” („Optimalizáció evolúció és rekombináció révén”), in M. C. Yovits, C. T. Jacobi, C. D. Goldstein, szerk., Self-Organizing Systems (*Önszervező rendszerek*), (Washington: Spartan Books, 1962), 93–106. o.

1984-ben Robert A. Freitas Jr. épített Bremermann munkájára, lásd Robert A. Freitas Jr., „Xenopsychology” („Xenopszichológia”), Analog 104 (1984. április): 41–53. o., <http://www.rfreitas.com/Astro/Xenopsychology.htm>

[\[196\]](#) $\pi \times 10^{50}$ maximális energia (10^{17} kg $\times$ méter² / szekundum² / ($6,6 \times 10^{-34}$) joule-szekundum = $\sim 5 \times 10^{50}$ művelet/szekundum.

[\[197\]](#) 5×10^{50} művelet per szekundum egyenlő 5×10^{21} (5 milliárdszor billió) emberi civilizációval (egyenként 1029 művelet per szekundummal számolva).

[\[198\]](#) Tízmilliárd (10^{10}) ember egyenként 10^{16} művelet per szekundummal számolva 10^{26} művelet per szekundumot jelent az egész emberi civilizációra nézve. Tehát 5×10^{50} művelet per szekundum megfelel 5×10^{24} (5 billiószor billió) emberi civilizációnak.

[\[199\]](#) Ez a becslés azzal a konzervatív feltételezéssel él, hogy tízmilliárd ember élt az elmúlt tízezer évben, ami nyilvánvalóan nem igaz. Az emberiség lélekszáma fokozatosan nőtt, míg 2000-ben el nem érte a körülbelül 6,1 milliárdot. Egy évben 3×10^7 másodperc van, tízezer évben pedig 3×10^{11} másodperc. Tehát az emberi civilizáció számítási kapacitásának 10^{26} művelet per szekundumos becsléséből kiindulva az emberi gondolkodás az elmúlt tízezer évben biztosan nem fejezhető ki 33×10^{37} számításnál magasabb értékkel. A végső laptop 5×10^{50} számítást végez el egyetlen másodperc alatt. Tízmilliárd ember tízezer évnyi gondolkodásának a szimulálása tehát körülbelül 10^{-13} másodpercig tartana neki, ami egy nanoszekundum egy tízezred része.

[\[200\]](#) Anders Sandberg, „The Physics of the Information Processing Superobjects: Daily Life Among the Jupiter Brains” (Az információfeldolgozó superobjektumok fizikája: a jupiteri agyak mindennapi élete), Journal of Evolution & Technology 5 (1999. december 22.).

[\[201\]](#) Lásd a [\[199\]](#) jegyzetet. 10^{42} művelet per szekundum 10^{-8} -szor kevesebb, mint 10^{50} művelet per szekundum, tehát az egy nanoszekundum egy tízezred részéből 10 mikroszekundum lesz.

[\[202\]](#) Drexler publikációinak és szabadalmainak a listáját illetően lásd <http://e-drexler.com/p/04/04/0330drexPubs.html>.

[\[203\]](#) 10^{12} dollárral és ezer (10^3) dolláronként 10^{26} művelet per szekundummal számolva, a 2040-es évek közepére elérjük a 10^{35} művelet per évet. Ez 10^9 -szer több, mint az emberi civilizáció teljes biológiai gondolkodásának 10^{26} művelet per szekunduma.

[\[204\]](#) 1984-ben Robert A. Freitas felvetette az egy rendszer számítási kapacitásának alapján meghatározható „értelmi hányados” (sentience quotient, SQ) logaritmikus skálájának gondolatát. A –70-től 50-ig terjedő skálán az emberi agy a 13-nál helyezkedik el, a Cray 1 szuperszámítógép pedig a 9-nél. Freitas értelmi hányadosa a tömegre vetített számítási kapacitáson alapul. Egy nagyon gyors, egyszerű algoritmust futtató számítógép SQ-ja magas. Az a mértékrendszer, amit ebben a részben a számítás vonatkozásában bemutatok, Freitas SQ-jára épít, és megpróbálja figyelembe venni a számítás hasznosságát is. Tehát ha egy egyszerűbb számítás megfeleltethető az éppen aktuálisan futtatottnak, akkor a számítási hatékonyságot az ekvivalens (egyszerűbb) számítás alapján határozzuk meg. Az én mértékrendszerem szerint a számításnak „hasznosnak” is kell lennie. Robert A. Freitas Jr., „Xenopsychology” („Xenopszichológia”), Analog 104 (1984. április): 41–53. o., <http://www.rfreitas.com/Astro/Xenopsychology.htm>.

[\[205\]](#) Csupán érdekes kitérőként: a kis sziklák oldalára készített vésetek valóban a számítógépes adattárolás egy korai formáját képviselik. Az írott nyelv egyik legkorábbi formája, az ékírás, ami i. e. 3000 körül alakult ki Mezopotámiában, képszerű jelekkel tárolta köveken az információt. A mezőgazdasági feljegyzéseket tálcákon tartott ékírással köveken őrizték, a köveket sorokba és oszlopokba rendezve. Gyakorlatilag ezek a kövek voltak az első táblázatok. Egy ilyen ékírással kő a történelmi számítógépekből álló gyűjteményem egyik nagy becsben tartott darabja.

[\[206\]](#) Ezer (10^3) bit 10^{-24} -ed része a kő atomjainak elméleti információátoló kapacitásának (aminek a becsült értéke 10^{27} bit).

[\[207\]](#) 1 művelet per szekundum (100 művelet per szekundum) 10^{-42} -ed része a kő atomjai képviselte elméleti számítási kapacitásnak (aminek a becsült értéke 10^{42} művelet per szekundum).

[\[208\]](#) Edgar Buckingham, „Jet Propulsion for Airplanes” („Lökhajtásos repülőgépek”), NACA report no. 159, in Ninth Annual Report of NACA–1923 (Washington: NACA, 1924), 75–90. o.

[209] Belle Dume, „Microscopy Moves to the Picoscale” („A mikroszkópia elérte a piko nagyságrendet”), PhysicsWeb, 2004. június 10., <http://physicsworld.com/cws/article/news/2004/jun/10/microscopy-moves-to-the-picoscale>, hivatkozva Stefan Hembacher, Franz J. Giessibl és Jochen Mannhart, „Force Microscopy with Light-Atom Probes” („Atomerő-mikroszkópia könnyűatom-szondákkal”), Science 305.5682 (2004. július 16.): 380–83. o. Ez az új „felharmonikus” erőmikroszkóp, amit az Augsburgi Egyetem fizikusai fejlesztettek ki, egyetlen szénatomot használ szondaként, a felbontása pedig legalább háromszor jobb, mint a hagyományos pásztázó alagútmikroszkópoké. A működése: a szonda wolframhegyét szubnanométeres amplitúdóval rezgetetik, így a hegy atomja és a szénatom közötti kölcsönhatás felharmonikus komponenseket hoz létre a szinuszjellegű hullámmintázatban. Ezeket a jeleket megmérve a tudósok rendkívül nagy felbontású képet kaptak a hegy atomjáról, melyen a 77 pikométeres (a pikométer a nanométer ezredrésze) jellemzők is kivehetők.

[210] Henry Fountain, „New Detector May Test Heisenberg’s Uncertainty Principle” („Az új érzékelő próbára teszi a Heisenberg-féle határozatlansági elvet”), New York Times, 2003. július 22.

[211] Mitch Jacoby, „Electron Moves in Attoseconds” („Attoszekundumos elektronmozgás”), Chemical and Engineering News 82.25 (2004. június 21.): 5. o., hivatkozva Peter Abbamonte et al., „Imaging Density Disturbances in Water with a 41.3-Attosecond Time Resolution” („Vízűrűség-zavarok képalkotása 41,3 attoszekundumos időbeli felbontással”), Physical Review Letters 92.23 (2004. június 11.): 237–401. o.

[212] S. K. Lamoreaux és J. R. Torgerson, „Neutron Moderation in the Oklo Natural Reactor and the Time Variation of Alpha” („Neutron-moderáció az oklói természetes reaktorban és az alfa időbeli változása”), Physical Review D 69 (2004): 121701–6. o.; Eugenie S. Reich, „Speed of Light May Have Changed Recently” („A közelmúltban megváltozhatott a fény sebessége”), New Scientist, 2004. június 30., <http://www.newscientist.com/article/dn6092-speed-of-light-may-have-changed-recently.html>.

[213] Charles Choi, „Computer Program to Send Data Back in Time” („Számítógépprogram-adatok küldésére vissza az időben”), UPI, 2002. október 1., http://www.upi.com/Science_News/2002/10/01/Computer-program-to-send-data-back-in-time/UPI-33801033495298/; Todd Brun, „Computers with Closed Timelike Curves Can Solve Hard Problems” („A zárt időszerű görbékkel rendelkező számítógépek nehéz problémákat is képesek megoldani”), Foundation of Physics Letters 16 (2003): 245–53. o., elektronikus kiadás, 2002. szeptember 11., <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0209061>.

[214] Lloyd Watts, „Visualizing Complexity in the Brain” („Az agy komplexitásának vizualizálása”), in D. Fogel és C. Robinson, szerk., Computational Intelligence: The Experts Speak (Számítógépes intelligencia: a szakértők véleménye) (Piscataway: IEEE Press/Wiley, 2003), <http://www.lloydwatts.com/wcci.pdf>.

[215] J. G. Taylor, B. Horwitz és K. J. Friston, „The Global Brain: Imaging and Modeling” („A globális agy: képalkotás és modellezés”), Neural Networks 13, különszám (2000): 827. o.

[216] Neil A. Busis, „Neurosciences on the Internet” („Idegtudomány az interneten”), <http://www.neuroguide.com>; „Neuroscientists Have Better Tools on the Brain” („Az idegtudósok egyre jobb eszközökkel vizsgálják az agyat”), Bio IT Bulletin, <http://www.bio-itworld.com/archive/041503/human-brain/>; „Brain Projects to Reap Dividends for Neurotech Firms” („Agykutatói projektek hasznot hoznak az idegtechnológiai cégeknek”), Neurotech Reports, <http://www.neurotechreports.com/pages/brainprojects.html>.

[217] Robert A. Freitas Jr., Nanomedicine, vol. 1, Basic Capabilities, section 4.8.6, „Noninvasive Neuroelectric Monitoring” („Nem invazív neuroelektromos megfigyelés”) (Georgetown: Landes Bioscience, 1999), 115–16. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/4.8.6.htm>.

[218] A harmadik fejezet elemezte ezt a kérdést, lásd *Az emberi agy számítási teljesítménye* című részt.

[219] Beszédfelismerési kutatások és fejlesztések, Kurzweil Applied Intelligence, amit 1982-ben alapítottam, és jelenleg a ScanSoft (korábban Kurzweil Computer Products) része.

[220] Lloyd Watts, U.S. Patent Application, U.S. Patent and Trademark Office, 20030095667, 2003. május 22., „Computation of Multi-sensor Time Delays” („Szenzorok közötti időeltérések kiszámítása”). Kivonat: „Leírásra került az első szenzor által érzékelt első jel és a második szenzor által érzékelt második jel közötti időeltérés meghatározásának a módja. Az első jel elemzéséből megállapításra kerülnek az első jel csatornáin különböző frekvenciákon, a második jel elemzéséből a második jel csatornáin különböző frekvenciákon. Érzékelésre kerül egy első jellemvonás, ami először bukkan fel az első jel csatornáinak egyikében. Érzékelésre kerül egy második vonás, ami másodikként bukkan fel a második jel csatornáinak egyikében. Az első jellemvonás összehasonlításra kerül a második jellemvonással, és az első időpont a második időponttal, meghatározandó az időbeli eltérést.” Lásd még Nabil H. Farhat, U.S. Patent Application 20040073415, U.S. Patent and Trademark Office, 2004. április 15., „Dynamical Brain Model for Use in Data Processing Applications” („Dinamikus agyi modellek használata az adatfeldolgozó alkalmazásokban”).

[221] Becslésem szerint a tömörített genom nagysága körülbelül harminc-százmillió byte (lásd a második fejezet [100] jegyzetét); ez kisebb, mint a Microsoft Word objektumkódja, és sokkal kisebb, mint a forráskód. Lásd a Word 2003 rendszerkövetelményeit, 2003. október 20., <http://www.microsoft.com/office/word/prodinfo/sysreq.mspx>.

[222] Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Epigenetics>.

[\[223\]](#) A genom információtartalmának, aminek méretét 30–100 millió byte-ra, azaz 10^9 bitnél kevesebbre becsülöm, elemzését illetően lásd a második fejezet [\[100\]](#) jegyzetét. Az emberi agyban található, becslésem szerint 10^{18} bit nagyságrendű információkról adott elemzésemet illetően lásd *Az emberi memóriakapacitás* című részt.

[\[224\]](#) Marie Gustafsson és Christian Balkenius, „Using Semantic Web Techniques for Validation of Cognitive Models against Neuroscientific Data” („Kognitív modellek összevetése idegtudományi adatokkal szemantikus webes technikák révén”), AILS04 Workshop, SAIS/SSLS Workshop (Swedish Artificial Intelligence Society; Swedish Society for Learning Systems), 2004. április 15–16., Lund, Svédország, <http://www.lunduniversity.lu.se/research-and-innovation/find-publications>.

[\[225\]](#) Lásd a harmadik fejezetet. Az egyik hasznos hivatkozásban, az idegsejtenkénti modellezéssel kapcsolatban Tomaso Poggio és Christof Koch azt írja az idegsejtről, hogy hasonló egy több ezer logikai kapuval rendelkező chiphez. Lásd T. Poggio és C. Koch, „Synapses That Compute Motion” („Mozgást számító szinapszisok”), Scientific American 256 (1987): 46–52. o. Lásd még C. Koch és T. Poggio, „Biophysics of Computational Systems: Neurons, Synapses, and Membranes” („Számítási rendszerek biofizikája: idegsejtek, szinapszisok és sejthártyák”), in Synaptic Function, G. M. Edelman, W. E. Gall, és W. M. Cowan, szerk. (New York: John Wiley and Sons, 1987), 637–97. o.

[\[226\]](#) Meadet illetően lásd http://www.technology.gov/Medal/2002/bios/Carver_A._Mead.pdf. Carver Mead, Analog VLSI and Neural Systems (Analóg, VLSI és neurális rendszerek), (Reading: Addison-Wesley, 1986).

[\[227\]](#) Egy önszervező neurális hálózat algoritmikus leírását lásd az ötödik fejezet [\[506\]](#) jegyzetében, egy önszervező genetikai algoritmus leírását pedig az ötödik fejezet [\[509\]](#) jegyzetében.

[\[228\]](#) Lásd Gary Dudley et al., „Autonomic Self-Healing Systems in a Cross-Product IT Environment” („Autonóm öngyógyító rendszerek egy többcélú IT-környezetben”), Proceedings of the IEEE International Conference on Autonomic Computing, New York City, 2004. május 17–19.; „About IBM Autonomic Computing” („Az IBM autonóm számítógépeiről”), <http://www-3.ibm.com/autonomic/about.shtml>; és Ric Telford, „The Autonomic Computing Architecture” („Az autonóm számítástechnikai architektúra”), 2004. április 14., <http://www.cs.st-andrews.ac.uk/files/2003-4-2%20Lecture2.pdf>.

[\[229\]](#) Christine A. Skarda és Walter J. Freeman, „Chaos and the New Science of the Brain” („A káosz és az új agytudomány”), Concepts in Neuroscience 1.2 (1990): 275–85. o.

[\[230\]](#) C. Geoffrey Woods, „Crossing the Midline” („A felezővonal átlépése”), Science 304.5676 (2004. június 4.): 1455–56. o.; Stephen Matthews, „Early Programming of the Hypothalamo-Pituitary-Adrenal Axis” („A hipotalamusz-hipofízis-adrenalin tengely korai programozása”), Trends in Endocrinology and Metabolism 13.9 (2001. november 1.): 373–80. o.; Justin Crowley és Lawrence Katz, „Early Development of Ocular Dominance Columns” („Az okuláris dominancia oszlopok korai fejlődése”), Science 290.5495 (2000. november 17.): 1321–24 o.; Anna Penn et al., „Competition in the Retinogeniculate Patterning Driven by Spontaneous Activity” („Spontán tevékenység által kiváltott versengés a retinogenikuláris mintázatban”), Science 279.5359 (1998. március 27.): 2108–12. o.; M. V. Johnston et al., „Sculpting the Developing Brain” („A fejlődő agy megformálása”), Advances in Pediatrics 48 (2001): 1–38. o.; P. LaCerra és R. Bingham, „The Adaptive Nature of the Human Neurocognitive Architecture: An Alternative Model” („Az emberi neurokognitív architektúra adaptív jellege: egy alternatív modell”), Proceedings of the National Academy of Sciences 95 (1998. szeptember 15.): 11290–94. o.

[\[231\]](#) A neurális hálózatok olyan egyszerűsített idegsejtmodellek, amelyek képesek az önszerveződésre és a problémamegoldásra. A neurális hálózatok algoritmikus leírását illetően lásd az ötödik fejezet [\[506\]](#) jegyzetét. A genetikai algoritmusok evolúciós modellek, amelyek szexuális úton szaporodnak, ellenőrzött mutációs aránnyal. A genetikai algoritmusok részletes leírását illetően lásd az ötödik fejezet [\[511\]](#) jegyzetét. A Markov-modellek egy matematikai eljárás termékei, ami bizonyos szempontból hasonló a neurális hálózatokhoz.

[\[232\]](#) Arisztotelész, The Works of Aristotle (Arisztotelész művei) ford. W. D. Ross (Oxford: Clarendon Press, 1908–1952) különös tekintettel a Fizikára.

[\[233\]](#) E. D. Adrian, The Basis of Sensation: The Action of Sense Organs (Az érzékelés alapjai: az érzékszervek működése), (London: Christophers, 1928).

[\[234\]](#) A. L. Hodgkin és A. F. Huxley, „Action Potentials Recorded from Inside a Nerve Fibre” („Egy idegrostban észlelt akciópotenciálok”), Nature 144 (1939): 710–12. o.

[\[235\]](#) A. L. Hodgkin és A. F. Huxley, „A Quantitative Description of Membrane Current and Its Application to Conduction and Excitation in Nerve” („A membránáram kvantitatív leírása és alkalmazása vezetésre és ingerlésre az idegben”), Journal of Physiology 117 (1952): 500–544. o.

[\[236\]](#) W. S. McCulloch és W. Pitts, „A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity” („Az idegi tevékenységben immanensen jelen lévő gondolatok logikai kalkulusa”), Bulletin of Mathematical Biophysics 5 (1943): 115–33. o. Ez egy korszakos, ám nehezen érthető írás. Egy jól érthető bevezetést és magyarázatot illetően lásd „A Computer Model of the Neuron” („Az idegsejt egy számítógépes modellje”), the Mind Project, Illinois State University, <http://www.mind.ilstu.edu/>.

[\[237\]](#) A neurális hálózatok algoritmikus leírását illetően lásd az ötödik fejezet [\[506\]](#) jegyzetét.

[238] E. Salinas és P. Thier, „Gain Modulation: A Major Computational Principle of the Central Nervous System” („Hangerő-moduláció: a központi idegrendszer egyik fő számítási tevékenysége”), *Neuron* 27 (2000): 15–21. o.

[239] K. M. O’Craven és R. L. Savoy, „Voluntary Attention Can Modulate fMRI Activity in Human MT/MST” („A szándékos odafigyelés képes modulálni az emberi MT/MST fMRI aktivitását”), *Investigational Ophthalmological Vision Science* 36 (1995): S856 (kieg.).

[240] Marvin Minsky és Seymour Papert, *Perceptrons* (Perceptronok), (Cambridge: MIT Press, 1969).

[241] Frank Rosenblatt, Cornell Aeronautical Laboratory, „The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain” („A perceptron: az agyi információtárolás és -szervezés valószínűségi modellje”), *Psychological Review* 65.6 (1958): 386–408. o.; lásd még Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Perceptron>.

[242] O. Sporns, G. Tononi és G. M. Edelman, „Connectivity and Complexity: The Relationship Between Neuroanatomy and Brain Dynamics” („Kapcsolatok és komplexitás: az összefüggés a neuroanatómia és az agyi dinamikák között”), *Neural Networks* 13.8–9 (2000): 909–22. o.

[243] R. H. Hahnloser et al., „Digital Selection and Analogue Amplification Coexist in a Cortex-Inspired Silicon Circuit” („A digitális kiválasztás és az analóg erősítés egymás mellett létezik az agykéregről mintázott szilícium-áramkörben”), *Nature* 405.6789 (2000. június 22.): 947–51. o.; „MIT and Bell Labs Researchers Create Electronic Circuit That Mimics the Brain’s Circuitry” („Az MIT és a Bell Labs kutatói olyan elektronikus áramkört hoztak létre, amely az agy áramköreit másolja”), *MIT News*, 2000. június 21., <http://web.mit.edu/newsoffice/nr/2000/machinebrain.html>.

[244] Manuel Trajtenberg, *Economic Analysis of Product Innovation: The Case of CT Scanners* (A termékinnováció gazdasági elemzése: a CT szkennerek esete), (Cambridge: Harvard University Press, 1990); Michael H. Priebe, Ph.D., a NEUROMED GmbH elnöke és vezérigazgatója; P-M. L. Robitaille, A. M. Abduljalil és A. Kangarlu, „Ultra High Resolution Imaging of the Human Head at 8 Tesla: 2K x 2K for Y2K” („Ultramagas felbontású felvételek az emberi fejről 8 Teslával: 2K × 2K Y2K-ra”), *Journal of Computer Assisted Tomography* 24.1 (2000. január–február): 2–8. o.

[245] Seong-Gi Kim, „Progress in Understanding Functional Imaging Signals” („Előrelépés a funkcionális képalkotás jeleinek megértésében”), *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100.7 (2003. április 1.): 3550–52. o., <http://www.pnas.org/content/100/7/3550.full>. Lásd még Seong-Gi Kim et al., „Localized Cerebral Blood Flow Response at Submillimeter Columnar Resolution” („Lokális agyi vérkeringési reakció milliméternél kisebb oszlopfelbontásnál”), *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98.19 (2001. szeptember 11.): 10904–9. o., <http://www.pnas.org/content/98/19/10904.abstract>.

[246] K. K. Kwong et al., „Dynamic Magnetic Resonance Imaging of Human Brain Activity During Primary Sensory Stimulation” („Dinamikus mágneses rezonanciás képalkotás az emberi agyi tevékenységről elsődleges érzékszervi stimuláció közben”), *Proceedings of the National Academy of Sciences* 89.12 (1992. június 15.): 5675–79. o.

[247] C. S. Roy és C. S. Sherrington, „On the Regulation of the Blood Supply of the Brain” („Az agy vérellátásának szabályozása”), *Journal of Physiology* 11 (1890): 85–105. o.

[248] M. I. Posner et al., „Localization of Cognitive Operations in the Human Brain” („A kognitív műveletek lokalizálása az emberi agyban”), *Science* 240.4859 (1988. június 17.): 1627–31. o.

[249] F. M. Mottaghy et al., „Facilitation of Picture Naming after Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation” („A képelnevezés elősegítése ismételt transzkraniális mágneses stimuláció után”), *Neurology* 53.8 (1999. november 10.): 1806–12. o.

[250] Daithí Ó hAnluain, „TMS: Twilight Zone Science?” („TMS: Alkonyzóna tudomány?”), *Wired News*, 2002. április 18., <http://wired.com/news/medtech/0,1286,51699.00.html>.

[251] Lawrence Osborne, „Savant for a Day” („Zseni egy napig”), *New York Times Magazine*, 2003. június 22., hozzáférhető a <http://www.wireheading.com/brainstim/savant.html> címen.

[252] Bruce H. McCormick, „Brain Tissue Scanner Enables Brain Microstructure Surveys” („Az agyszövetszkennerek lehetővé teszik az agy mikrostruktúrájának a megismerését”), *Neurocomputing* 44–46 (2002): 1113–18. o.; Bruce H. McCormick, „Design of a Brain Tissue Scanner” („Egy agyszövetszkennerek felépítése”), *Neurocomputing* 26–27 (1999): 1025–32. o.; Bruce H. McCormick, „Development of the Brain Tissue Scanner” („Az agyszövetszkennerek kifejlesztése”), *Brain Networks Laboratory Technical Report*, Texas A&M University Department of Computer Science, College Station, 2002. március 18., <http://research.cs.tamu.edu/bnl/pubs/McC02.pdf>.

[253] Leif Finkel et al., „Meso-scale Optical Brain Imaging of Perceptual Learning” („Közepes skálájú optikai agyi képalkotás a perceptuális tanulás során”), *University of Pennsylvania ösztöndíj* 2000–01737 (2000).

[254] E. Callaway és R. Yuste, „Stimulating Neurons with Light” („Idegsejtek stimulálása fénnel”), *Current Opinions in Neurobiology* 12.5 (2002. október): 587–92. o.

[255] B. L. Sabatini és K. Svoboda, „Analysis of Calcium Channels in Single Spines Using Optical Fluctuation Analysis” („A

kalciumcsatornák elemzése az egyes tüskékben optikai fluktuációs analízis révén”), *Nature* 408.6812 (2000. november 30.): 589–93. o.

[256] John Whitfield, „Lasers Operate Inside Single Cells” („Lézeres beavatkozás egyes sejteken belül”), *News@nature.com*, 2003. október 6., <http://www.nature.com/nsu/030929/030929-12.html> (előfizetőknek). Mazur laboratóriuma: <http://mazur-www.harvard.edu/research/>. Jason M. Samonds és A. B. Bonds, „From Another Angle: Differences in Cortical Coding Between Fine and Coarse Discrimination of Orientation” („Egy másik szemszögből: különbségek a finom és durva tájékozódási diszkrimináció agykérgi kódolásában”), *Journal of Neurophysiology* 91 (2004): 1193–1202. o.

[257] Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine (Nanogyógyászat)*, 2A kötet, *Biocompatibility*, 15.6.2 szakasz, „Bloodstream Intrusiveness” (Georgetown: Landes Bioscience, 2003), 157–59. o., <http://www.nanomedicine.com/NMIIA/15.6.2.htm>.

[258] Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, 1. kötet, *Basic Capabilities*, 7.3 szakasz, „Communication Networks” (Georgetown: Landes Bioscience, 1999), 186–88. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.3.htm>.

[259] Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, 1. kötet, *Basic Capabilities*, 9.4.4.3 szakasz, „Intercellular Passage” (Georgetown: Landes Bioscience, 1999), 320–21. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/9.4.4.3.htm#p2>.

[260] Keith L. Black, M.D. és Nagendra S. Ningaraj, „Modulation of Brain Tumor Capillaries for Enhanced Drug Delivery Selectively to Brain Tumor” („Agydaganat hajszálereinek módosítása, hogy csak a tumorhoz szállítsanak gyógyszereket”), *Cancer Control* 11.3 (2004. május/június): 165–73. o., <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15153840>.

[261] Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, 1. kötet, *Basic Capabilities*, 4.1 szakasz, „Nanosensor Technology” (Georgetown: Landes Bioscience, 1999), 93. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/4.1.htm>.

[262] Konferencia a haladó nanotechnológiáról (Conference on Advanced Nanotechnology, <http://www.foresight.org/Conference/AdvNano2004/index.html>), NanoBioTech Congress and Exhibition (<http://www.nanobiotec.de/>), NanoBusiness Trends in Nanotechnology (<http://www.nanoevent.com/>), és NSTI Nanotechnology Conference és Trade Show (<http://www.nsti.org/about/events.html>).

[263] Peter D. Kramer, *Listening to Prozac* (A Prozacra hallgatva), (New York: Viking, 1993).

[264] LeDoux azokat az agyterületeket kutatja, amelyek a fenyegető stimulusokat kezelik. A legfontosabb közülük az *amygdala*, az agy alján található, mandula alakú terület. Az *amygdala* eltárolja a fenyegető ingerek emlékeit, és szabályozza a félelemmel kapcsolatos reakciókat. Tomaso Poggio, az MIT agykutatója rámutat, hogy a „szinaptikus rugalmasság a tanulás egyik hardver-szubsztrátuma, ugyanakkor fontos lehet hangsúlyozni, hogy a tanulás sokkal többet jelent a pusztá emlékezetnél”. Lásd T. Poggio és E. Bizzi, „Generalization in Vision and Motor Control” („Általánosítás a látás- és motoros vezérlés során”), *Nature* 431 (2004): 768–74. o. Lásd még E. Benson, „The Synaptic Self” („A szinaptikus én”), *APA Online*, 2002. november, <http://www.apa.org/monitor/nov02/synaptic.html>.

[265] Anthony J. Bell, „Levels and Loops: The Future of Artificial Intelligence and Neuroscience” („Szintek és hurkok: a mesterséges intelligencia és az idegtudomány jövője”), *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 354.1352 (1999. december 29.): 2013–20. o., <http://www.cnl.salk.edu/~tony/ptrsl.pdf>.

[266] Peter Dayan és Larry Abbott, *Theoretical Neuroscience: Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems* (Elméleti idegtudomány: neurális rendszerek számítástechnikai és matematikai modellezése), (Cambridge: MIT Press, 2001).

[267] D. O. Hebb, *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory* (A viselkedés szerveződése: egy neuropszichológiai elmélet), (New York: Wiley, 1949).

[268] Michael Domjan és Barbara Burkhard, *The Principles of Learning and Behavior* (A tanulás és viselkedés alapelvei), 3. kiadás, (Pacific Grove: Brooks/Cole, 1993).

[269] J. Quintana és J. M. Fuster, „From Perception to Action: Temporal Integrative Functions of Prefrontal and Parietal Neurons” („Az észleléstől a cselekvésig: a prefrontális és parietális idegsejtek temporális integratív funkciói”), *Cerebral Cortex* 9.3 (1999. április–május): 213–21. o.; W. F. Asaad, G. Rainer és E. K. Miller, „Neural Activity in the Primate Prefrontal Cortex During Associative Learning” („A főemlősök prefrontális agykérgének idegsejt-aktivitása asszociatív tanulás közben”), *Neuron* 21.6 (1998. december): 1399–1407. o.

[270] G. G. Turrigiano et al., „Activity-Dependent Scaling of Quantal Amplitude in Neocortical Neurons” („A kvantális amplitúdó tevékenységfüggő skálázása az új agykérgi idegsejtekben”), *Nature* 391.6670 (1998. február 26.): 892–96. o.; R. J. O’Brien et al., „Activity-Dependent Modulation of Synaptic AMPA Receptor Accumulation” („A szinaptikus AMPA-receptor akkumuláció tevékenységfüggő modulációja”), *Neuron* 21.5 (1998. november): 1067–78. o.

[271] „A New Window to View How Experiences Rewire the Brain” („Új ablak arra, hogyan változtatják meg a tapasztalatok az agyat”), Howard Hughes Medical Institute (2002. december 19.), <http://www.hhmi.org/news/svoboda2.html>. Lásd még J. T. Trachtenberg et al., „Long-Term in Vivo Imaging of Experience-Dependent Synaptic Plasticity in Adult Cortex” („Hosszú távú *in vivo* képalkotás a tapasztalatfüggő szinaptikus rugalmasságról a felnőtt agykéregben”), *Nature* 420.6917 (2000. december): 788–94. o.,

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12490942>; és Karen Zita és Karel Svoboda, „Activity-Dependent Synaptogenesis in the Adult Mammalian Cortex” („Tevékenységfüggő szinapszisképződés a felnőtt emlős agykéregben”), Neuron 35.6 (2002. szeptember): 1015–17. o., <http://svobodalab.cshl.edu/reprints/2414zito02neur.pdf>.

{272} ásd http://whyfiles.org/184make_memory/4.html. A dendrittüskéket és az emlékezetet illetően lásd még J. Grutzendler et al., „Long-Term Dendritic Spine Stability in the Adult Cortex” („Hosszú távú dendrittüske-stabilitás a felnőtt agykéregben”), Nature 420.6917 (2002. december 19–26.): 812–16. o.

{273} S. R. Young és E. W. Rubel, „Embryogenesis of Arborization Pattern and Typography of Individual Axons in N. Laminaris of the Chicken Brain Stem” („Az arborizáció-mintázat és -tipográfia embriogenezise az egyes axonokban a tyúk agytörzsének n. laminarisában”), Journal of Comparative Neurology 254.4 (1986. december 22): 425–59. o.

{274} Scott Makeig, „Swartz Center for Computational Neuroscience Vision Overview” („Áttekintés a Swartz Számítógépes Idegtudományi Központról”), <http://www.sccn.ucsd.edu/VisionOverview.html>.

[\[275\]](#) D. H. Hubel és T. N. Wiesel, „Binocular Interaction in Striate Cortex of Kittens Reared with Artificial Squint” („Binokuláris interakció a mesterségesen kancsalnak tenyésztett macskák barázdált agykérgében”), *Journal of Neurophysiology* 28.6 (1965. november): 1041–59. o.

[\[276\]](#) Jeffrey M. Schwartz és Sharon Begley, *The Mind and the Brain: Neuroplasticity and the Power of Mental Force* (Az elme és az agy: neuroplaszticitás és a szellemi erő hatalma), (New York: Regan Books, 2002). Lásd még C. Xerri, M. Merzenich et al., „The Plasticity of Primary Somatosensory Cortex Paralleling Sensorimotor Skill Recovery from Stroke in Adult Monkeys” („Az elsődleges szomatoszenzoros kéreg rugalmassága és a szenzomotoros képességek visszanyerése stroke után felnőtt majmokban”), *The Journal of Neurophysiology*, 79.4 (1980. április): 2119–48. o. Lásd még S. Begley, „Survival of the Busiest” („A legelfoglaltabb túlélése”), *Wall Street Journal*, 2002. október 11., <http://webreprints.djreprints.com/606120211414.html>.

[\[277\]](#) Paula Tallal et al., „Language Comprehension in Language-Learning Impaired Children Improved with Acoustically Modified Speech” („A beszédmegértés fejlesztése akusztikusan módosított beszéddel beszédtanulásban gátolt gyermekeknél”), *Science* 271 (1996. január 5.): 81–84. o. Paula Tallal a CMBN (Center for Molecular and Behavioral Neuroscience, Molekuláris és Viselkedési Idegtudományi Központ) igazgatótanácsának idegtudomány-professzora, a Rutgers Egyetem társigazgatója, illetve az SCIL (Scientific Learning Corporation, Tudományos Tanulási Vállalat) egyik alapító igazgatója, lásd <http://www.ncas.rutgers.edu/paula-tallal>. Lásd még Paula Tallal, „Language Learning Impairment: Integrating Research and Remediation” („Beszédtanulási zavarok: a kutatások és a gyógyítás integrálása”), *New Horizons for Learning* 4.4 (1998. augusztus–szeptember), <http://www.newhorizons.org/neuro/tallal.htm>, A. Pascual-Leone, „The Brain That Plays Music and Is Changed by It” („A zenélő agyat megváltoztatja a zene”), *Annals of the New York Academy of Sciences* 930 (2001. június): 315–29. o. Lásd még a [\[276\]](#) jegyzetet fentebb.

[\[278\]](#) F. A. Wilson, S. P. Scalaidhe és P. S. Goldman-Rakic, „Dissociation of Object and Spatial Processing Domains in Primate Prefrontal Cortex” („Az objektum- és térfeldolgozó területek szétválasztása a főemlősök prefrontális agykérgében”), *Science* 260.5116 (1993. június 25.): 1955–58. o.

[\[279\]](#) C. Buechel, J. T. Coull és K. J. Friston, „The Predictive Value of Changes in Effective Connectivity for Human Learning” („A hatékony kapcsolatok változásainak prediktív értéke az emberi tanulás szempontjából”), *Science* 283.5407 (1999. március 5.): 1538–41. o.

[\[280\]](#) Drámai felvételeket készítettek a különböző stimulusok hatására ideiglenes és tartós kapcsolatokat létrehozó agysejtekről, illusztrálva azokat az idegsejtek közötti változásokat, melyek, ahogyan azt sok tudós már régóta feltételezte, az emlékek tárolásakor következnek be. „Pictures Reveal How Nerve Cells Form Connections to Store Short- and Long-Term Memories in Brain” („Felvételek arról, hogyan hoznak létre az idegsejtek kapcsolatokat a rövid és hosszú távú emlékek tárolására az agyban”), University of California, San Diego, 2001. november 29., [http://www.cell.com/abstract/S0092-8674\(01\)00579-7](http://www.cell.com/abstract/S0092-8674(01)00579-7); M. A. Colicos et al., „Remodeling of Synaptic Actin Induced by Photoconductive Stimulation” („A fotokonduktív stimuláció által kiváltott szinaptikus aktin új modellje”), *Cell* 107.5 (2001. november 30): 605–16. o. Videolink: <http://www.qflux.net/>, Neural Silicon Interface – Quantum Flux.

[\[281\]](#) S. Lowel és W. Singer, „Selection of Intrinsic Horizontal Connections in the Visual Cortex by Correlated Neuronal Activity” („Belső horizontális kapcsolatok kiválasztása a vizuális agykéregben megfigyelt idegsejti aktivitás révén”), *Science* 255.5041 (1992. január 10): 209–12. o.

[\[282\]](#) K. Si et al., „A Neuronal Isoform of CPEB Regulates Local Protein Synthesis and Stabilizes Synapse-Specific Long-Term Facilitation in Aplysia” („A CPEB idegsejti izoformája szabályozza a helyi fehérjeszintézist és stabilizálja a szinapszis-specifikus hosszú távú facilitációt az *Aplysia*-ban”), *Cell* 115.7 (2003. december 26): 893–904. o.; K. Si, S. Lindquist és E. R. Kandel, „A Neuronal Isoform of the Aplysia CPEB Has Prion-Like Properties” („Az *Aplysia* CPEB-jének egyik idegsejti izoformája prionszerű jellemzőkkel bír”), *Cell* 115.7 (2003. december 26.): 879–91. o. A kutatók megállapították, hogy a CPEB segítheti a hosszú távú emlékek kialakulását és megőrzését azzal, hogy a prionok (a kergemarhakórban és egyéb idegrendszeri betegségeknél kimutatott fehérjetöredékek) deformációihoz hasonló változásokat okoz a szinapszisokban. A tanulmány szerint ez a fehérje prionállapotban fejt ki jótékony hatását, ellentmondva annak a széles körben elterjedt feltételezésnek, hogy a prionaktivitással bíró fehérjék toxikusak, vagy legalábbis nem működnek megfelelően. Eric R. Kandel, a 2000. évi orvostudományi Nobel-díj nyertese, a Columbia Egyetem fiziológia, sejtbiofizika, pszichiátria, biokémia és molekuláris biofizika professzora azt gyanítja, hogy ennek a prionmechanizmusnak szerepe lehet olyan területeken is, mint a rák fenntartása és a szervek fejlődése. Lásd a Whitehead Institute sajtóközleményét, http://www.wi.mit.edu/nap/features/nap_feature_memory.html.

[\[283\]](#) M. C. Anderson et al., „Neural Systems Underlying the Suppression of Unwanted Memories” („A nemkívánatos emlékek elnyomása mögött rejlő idegsejtszervezetek”), *Science* 303.5655 (2004. január 9.): 232–35. o. Az eredmények új módszereket nyithatnak meg a traumatikus emlékek feldolgozásának területén. Keay Davidson, „Study Suggests Brain Is Built to Forget: MRIs in Stanford Experiments Indicate Active Suppression of Unneeded Memories” („A kutatások szerint az agy felejtésre van tervezve: a Stanford MRI-kísérletei a nemkívánatos emlékek aktív elfojtására utalnak”), *San Francisco Chronicle*, 2004. január 9., <http://www.sfgate.com/news/article/Brain-is-built-to-forget-research-says-MRIs-in-2831647.php>.

[\[284\]](#) Dieter C. Lie et al., „Neurogenesis in the Adult Brain: New Strategies for CNS Diseases” („Neurogenesis a felnőtt agyban: a központi idegrendszer betegségei kezelésének új stratégiái”), *Annual Review of Pharmacology and Toxicology* 44 (2004): 399–421. o.

[\[285\]](#) H. van Praag, G. Kempermann és F. H. Gage, „Running Increases Cell Proliferation and Neurogenesis in the Adult Mouse Dentate Gyrus” („A futás fokozza a sejtosztódást és a neurogenézist a felnőtt egerek agytekevényszerkeiben”), *Nature Neuroscience* 2.3 (1999. március): 266–70. o.

[\[286\]](#) Minsky és Papert, *Perceptrons* (Perceptronok).

[\[287\]](#) Ray Kurzweil, *The Age of Spiritual Machines* (A spirituális gépek kora), (New York: Viking, 1999), 79. o.

[\[288\]](#) A bázisfüggvények olyan nemlineáris függvények, melyek lineáris kombinációjával (több súlyozott bázisfüggvény összeadásával) megkapható vagy megközelíthető bármilyen nemlineáris függvény. Pouget és Snyder, „Computational Approaches to Sensorimotor Transformations” („A szenzomotoros transzformációk számítástechnikai megközelítése”), *Nature Neuroscience* 3.11 kieg. (2000. november): 1192–98. o.

[\[289\]](#) T. Poggio, „A Theory of How the Brain Might Work” („Egy elmélet az agy lehetséges működéséről”), in *Proceedings of Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 4 (Cold Spring Harbor: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1990), 899–910. o. Lásd még T. Poggio és E. Bizzi, „Generalization in Vision and Motor Control” („Generalizáció a látásban és a motoros kontrollban”), *Nature* 431 (2004): 768–74. o.

[\[290\]](#) R. Llinas és J. P. Welsh, „On the Cerebellum and Motor Learning” („A kisagy és a motoros tanulás”), *Current Opinion in Neurobiology* 3.6 (1993. december): 958–65. o.; E. Courchesne és G. Allen, „Prediction and Preparation, Fundamental Functions of the Cerebellum” („Predikció és felkészülés, a kisagy alapvető funkciói”), *Learning and Memory* 4.1 (1997. május–június): 1–35. o.; J. M. Bower, „Control of Sensory Data Acquisition” („Az érzékszervi adatszerzés irányítása”), *International Review of Neurobiology* 41 (1997): 489–513. o.

[\[291\]](#) J. Voogd és M. Glickstein, „The Anatomy of the Cerebellum” („A kisagy anatómiája”), *Trends in Neuroscience* 21.9 (1998. szeptember): 370–75. o.; John C. Eccles, Masao Ito és János Szentágothai, *The Cerebellum as a Neuronal Machine* (A kisagy mint neurális gép), (New York: Springer-Verlag, 1967); Masao Ito, *The Cerebellum and Neural Control* (A kisagy és a neurális kontroll), (New York: Raven, 1984).

[\[292\]](#) N. Bernstein, *The Coordination and Regulation of Movements* (A mozgás koordinálása és szabályozása), (New York: Pergamon Press, 1967).

[\[293\]](#) U. S. Office of Naval Research sajtóközlemény, „Boneless, Brainy, and Ancient” („Csonttalan, agyas és ősrégi”), 2001. szeptember 26., http://www.eurekalert.org/pub_releases/2001-11/oonr-bba112601.php; a polip karja „lehet a következő generációs robotkarok alapja a tenger alatti, űrbeli és földi alkalmazásokhoz”.

[\[294\]](#) S. Grossberg és R. W. Paine, „A Neural Model of Cortico-Cerebellar Interactions During Attentive Imitation and Predictive Learning of Sequential Handwriting Movements” („A szekvenciális kézírásmozgások attentív utánzása és prediktív tanulása során megfigyelhető agykérgi-kisagyi kölcsönhatások neurális modellje”), *Neural Networks* 13.8-9 (2000. október–november): 999–1046. o.

[\[295\]](#) Voogd és Glickstein, „Anatomy of the Cerebellum” („A kisagy anatómiája”); Eccles, Ito és Szentágothai, *Cerebellum as a Neuronal Machine* (A kisagy mint neurális gép); Ito, *Cerebellum and Neural Control* (A kisagy és a neurális kontroll); R. Llinas, in *Handbook of Physiology*, 2. kötet, *The Nervous System*, szerk. V. B. Brooks (Bethesda: American Physiological Society, 1981), 831–976. o.

[\[296\]](#) J. L. Raymond, S. G. Lisberger és M. D. Mauk, „The Cerebellum: A Neuronal Learning Machine?” („A kisagy: idegsejti tanulógép?”), *Science* 272.5265 (1996. május 24.): 1126–31. o.; J. J. Kim és R. F. Thompson, „Cerebellar Circuits and Synaptic Mechanisms Involved in Classical Eyeblink Conditioning” („A klasszikus szemrebbenés kondicionálásában részt vevő kisagyi áramkörök és szinaptikus mechanizmusok”), *Trends in Neuroscience* 20.4 (1997. április): 177–81. o.

[\[297\]](#) A szimulációban 10 000 szemcsesejt, 900 Golgi-sejt, 500 moharostos sejt, 20 Purkinje-sejt és 6 idegsejt szerepelt.

[\[298\]](#) J. F. Medina et al., „Timing Mechanisms in the Cerebellum: Testing Predictions of a Large-Scale Computer Simulation” („Időzítési mechanizmusok a kisagyban: előrejelzések tesztelése egy nagy ívű számítógépes szimulációban”), *Journal of Neuroscience* 20.14 (2000. július 15.): 5516–25. o.; Dean Buonomano és Michael Mauk, „Neural Network Model of the Cerebellum: Temporal Discrimination and the Timing of Motor Responses” („A kisagy neurális hálózati modellje: időbeli diszkrimináció és a motoros válaszok időzítése”), *Neural Computation* 6.1 (1994): 38–55. o.

[\[299\]](#) Medina et al., „Timing Mechanisms in the Cerebellum” („Időzítési mechanizmusok a kisagyban”).

[\[300\]](#) Carver Mead, *Analog VLSI and Neural Systems* (Analóg VLSI és neurális rendszerek), (Boston: Addison-Wesley Longman, 1989).

[\[301\]](#) Lloyd Watts, „Visualizing Complexity in the Brain” („A komplexitás vizualizálása az agyban”), in *Computational Intelligence: The Experts Speak* (Számítógépes intelligencia: a szakértők véleménye), D. Fogel és C. Robinson, szerk. (Hoboken: IEEE Press/Wiley, 2003), 45–56. o., <http://www.lloydwatts.com/wcci.pdf>.

[\[302\]](#) Uo.

[\[303\]](#) Lásd <http://www.lloydwatts.com/neuroscience.shtml>. NanoComputer Dream Team, „The Law of Accelerating Returns, Part II” („A gyorsuló megtérülések törvénye, II. része), <http://nanocomputer.org/>.

[\[304\]](#) Lásd http://info.med.yale.edu/bbs/faculty/she_go.html.

[\[305\]](#) Gordon M. Shepherd, szerk., The Synaptic Organization of the Brain, 4. kiadás. (New York: Oxford University Press, 1998), vi. o.

[\[306\]](#) E. Young, „Cochlear Nucleus” („Nucleus cochlearis”), *uo.*, 121–58. o.

[\[307\]](#) Tom Yin, „Neural Mechanisms of Encoding Binaural Localization Cues in the Auditory Brainstem” („A binaurális helymeghatározási támpontok kódolásának neurális mechanizmusai a hallási agytörzsben”), in D. Oertel, R. Fay és A. Popper, szerk., Integrative Functions in the Mammalian Auditory Pathway (Integratív funkciók az emlősök hallórendszerében), (New York: Springer-Verlag, 2002), 99–159. o.

[\[308\]](#) John Casseday, Thane Premouw és Ellen Covey, „The Inferior Colliculus: A Hub for the Central Auditory System” („A *colliculus inferior*: a központi hallórendszer csomópontja”), in Oertel, Fay és Popper, Integrative Functions in the Mammalian Auditory Pathway (Integratív funkciók az emlősök hallórendszerében), 238–318. o.

[\[309\]](#) Lloyd Watts ábrája, <http://www.lloydwatts.com/neuroscience.shtml>, átvéve: E. Young, „Cochlear Nucleus” („Nucleus cochlearis”) in G. Shepherd, szerk., The Synaptic Organization of the Brain, (Az agy szinaptikus szerveződése) 4. kiadás (New York: Oxford University Press, 2003 [első kiadás: 1998]), 121–58. o.; D. Oertel in D. Oertel, R. Fay és A. Popper, szerk., Integrative Functions in the Mammalian Auditory Pathway (Integratív funkciók az emlősök hallórendszerében), (New York: Springer-Verlag, 2002), 1–5. o.; John Casseday, T. Fremouw és E. Covey, „Inferior Colliculus” („*Colliculus inferior*”), *uo.*; J. LeDoux, The Emotional Brain (Az érzelmes agy), (New York: Simon & Schuster, 1997); J. Rauschecker és B. Tian, „Mechanisms and Streams for Processing of ‚What’ and ‚Where’ in Auditory Cortex” („A »mi?« és »hol?« feldolgozására szolgáló mechanizmusok és csatornák a halló agykéregben”), Proceedings of the National Academy of Sciences 97.22: 11800–11806. o.

A modellezett agyterületek:

- *Cochlea* (csiga): A hallószerv. Harmincezer szőrsejt alakítja át a kengyelcsontok mozgását a hang spektrotémporális leképezésévé.
- MC: Multipoláris sejtek. A frekvenciaeloszlást mérik.
- GBC: Globuláris bushy-sejtek. Tüzelési sorozatot közvetítenek a hallóidegektől a laterális felső olajka komplexumhoz (magában foglalja az LSO-t és az MSO-t). Kódolja a jelek időzítését és amplitúdóját a szint binaurális összehasonlításához.
- SBC: Szferikális bushy-sejtek. Időben pontosítják a jel beérkezésének az idejét, az interaurális időeltérés-számítás (a két fülbe érkező hang időbeli eltérése, amely alapján meghatározható a hang forrásának helye) előfeldolgozójaként.
- OC: Octopus-sejtek. A tranzienseket érzékelik.
- DCN: *nucleus cochlearis dorsalis*. A spektrális élek érzékelése és a zajszint kalibrálása.
- VNTB: A trapéztest ventrális nucleusa. Visszacsatolja a jeleket a külső szőrsejtfunkciók modulálásához a csigában.
- VNLL, PON: A *lateralis lemniscus* ventrális *nucleusa*; *periolivaris nucleusok*: az OC tranzienseinek feldolgozása.
- MSO: *Oliva superior medialis*. Interaurális időeltérések kiszámítása.
- LSO: *Oliva superior lateralis*. Szintén az interaurális időeltérések kiszámításában van szerepe.
- ICC: A *colliculus inferior* centralis nucleusa. A többféle hangleképzés integrálásának fő helye.
- ICx: A *colliculus inferior* exterior nucleusa. A hang helymeghatározásának további pontosítása.
- SC: *Colliculus superior*. A hallás-látás egyesítésének helye.
- MGB: Mediális genikuláris test. A talamusz hallórésze.
- LS: Limbikus rendszer. Számos, az érzelmekkel, emlékezettel, stb. területtel kapcsolatba hozott struktúrából áll.
- AC: Halló agykéreg.

[\[310\]](#) M. S. Humayun et al., „Human Neural Retinal Transplantation” („Emberi neurálisretina-átültetés), Investigative Ophthalmology and Visual Science 41.10 (2000. szeptember): 3100–3106. o.

[\[311\]](#) Information Science and Technology Colloquium Series, 2001. május 23., <http://cbcl.mit.edu/news/files/GSFC-talk.html>.

[\[312\]](#) Kah-Kay Sung és Tomaso Poggio, „Example-Based Learning for View-Based Human Face Detection” („Példaalapú tanulás nézetalapú emberi arcfelismeréshez”), IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 20.1 (1998): 39–51. o., <http://www.vision.caltech.edu/CNS179/papers/Poggio98.pdf>.

[\[313\]](#) Maximilian Riesenhuber Tomaso Poggio, „A Note on Object Class Representation and Categorical Perception” („Megjegyzés az objektumosztály-reprezentációról és a kategóriák érzékeléséről”), Center for Biological and Computational Learning, MIT, AI Memo 1679 (1999), <ftp://publications.ai.mit.edu/ai-publications/pdf/AIM-1679.pdf>.

[\[314\]](#) K. Tanaka, „Inferotemporal Cortex and Object Vision” („Az inferotemporális cortex és a tárgylátás”), Annual Review of Neuroscience 19 (1996): 109–39. o.; Anuj Mohan, „Object Detection in Images by Components” („Tárgyfelismerés képeken

alkotórészek alapján”), Center for Biological and Computational Learning, MIT, AI Memo 1664 (1999), <http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/12185/ftp:zSzzSpublications.ai.mit.eduzSzi-publicationszSzi1500-1999zSziAIM-1664.pdf/mohan99object.pdf>; Anuj Mohan, Constantine Papageorgiou és Tomaso Poggio, „Example-Based Object Detection in Images by Components” („Példaalapú tárgyfelismerés képeken alkotórészek alapján”), IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 23.4 (2001. április), <http://cbcl.mit.edu/projects/cbd/publications/ps/mohan-ieee.pdf>; B. Heisele, T. Poggio és M. Pontil, „Face Detection in Still Gray Images” („Arcfelismerés szürkeárnyaltos állóképeken”), Artificial Intelligence Laboratory, MIT, Technical Report AI Memo 1687 (2000). Lásd még Bernd Heisele, Thomas Serre és Stanley Bilesch, „Component-Based Approach to Face Detection” („Az arcfelismerés alkotórész-alapú megközelítése”), Artificial Intelligence Laboratory and the Center for Biological and Computational Learning, MIT (2001), <http://cbcl.mit.edu/res-area/abstracts/2001-abstracts/heisele/>.

[\[315\]](#) D. Van Essen és J. Gallant, „Neural Mechanisms of Form and Motion Processing in the Primate Visual System” („Az alak- és mozgásfeldolgozás neurális mechanizmusai a főemlősök látórendszerében”), Neuron 13.1 (1994. július): 1–10. o.

[\[316\]](#) Shimon Ullman, High-Level Vision: Object Recognition and Visual Cognition (Magas szintű látás: tárgyfelismerés vizuális ismeretszerzés), (Cambridge: MIT Press, 1996); D. Mumford, „On the Computational Architecture of the Neocortex. II. The Role of Corticocortical Loops” („Az új agykéreg számítástechnikai architektúrájáról II, A kortikokortikális hurkok szerepe”), Biological Cybernetics 66.3 (1992): 241–51. o.; R. Rao és D. Ballard, „Dynamic Model of Visual Recognition Predicts Neural Response Properties in the Visual Cortex” („A vizuális felismerés dinamikus modellje előrejelzi a vizuális agykéreg neurális reakcióinak jellemzőit”), Neural Computation 9.4 (1997. május 15.): 721–63. o.

[\[317\]](#) B. Roska és F. Werblin, „Vertical Interactions Across Ten Parallel, Stacked Representations in the Mammalian Retina” („Vertikális interakciók tíz párhuzamos, egymást fedő reprezentáció között az emlősök retináján”), Nature 410.6828 (2001. március 29.): 583–87. o.; University of California, Berkeley, sajtóközlemény, „Eye Strips Images of All but Bare Essentials Before Sending Visual Information to Brain, UC Berkeley Research Shows” („A Kaliforniai Egyetem kutatásai szerint a szem a leglényegesebbeken kívül minden vizuális információt eltávolít a képekből, mielőtt továbbítja az agynak”), 2001. március 28., www.berkeley.edu/news/media/releases/2001/03/28_wers1.html.

[\[318\]](#) Hans Moravec és Scott Friedman Moravec kutatásaira támaszkodva megalapították a Seegrid nevű robotikai céget. Lásd www.Seegrid.com.

[\[319\]](#) M. A. Mahowald és C. Mead, „The Silicon Retina” („A szilíciumretina”), Scientific American 264.5 (1991. május): 76–82. o.

[\[320\]](#) Konkrétan egy alacsony áteresztésű szűrőt alkalmaznak egy receptorra (például egy fotoreceptorra). Ezt megszorozzák a szomszédos receptor jelével. Ha ez mindkét irányban lezajlott, és mindkét művelet eredményét kivonják a nullából, akkor a kimenet a mozgás irányát fogja jelölni.

[\[321\]](#) Bergert illetően lásd <http://cne.usc.edu/>.

[\[322\]](#) „The World’s First Brain Prosthesis” („A világ első agyprotézise”), New Scientist 177.2386 (2003. március 15.): 4. o., <http://www.newscientist.com/article/dn3488-worlds-first-brain-prosthesis-revealed.html>.

[\[323\]](#) Charles Choi, „Brain-Mimicking Circuits to Run Navy Robot” („Az agyat utánzó áramkörök vezérlik a haditengerészet robotját”), UPI, 2004. június 7., http://www.upi.com/Science_News/2004/06/07/Brain-mimicking-circuits-to-run-navy-robot/UPI-60861086620400/.

[\[324\]](#) Giacomo Rizzolatti et al., „Functional Organization of Inferior Area 6 in the Macaque Monkey. II. Area F5 and the Control of Distal Movements” („A makákómajomagy 6-os területének funkcionális felépítése II., Az F5 terület és a disztális mozgások”), Experimental Brain Research 71.3 (1998): 491–507. o.

[\[325\]](#) M. A. Arbib, „The Mirror System, Imitation, and the Evolution of Language” („A tükörrendszer, az utánzás és a nyelv evolúciója”), in Kerstin Dautenhahn és Chrystopher L. Nehaniv, szerk., Imitation in Animals and Artifacts (Utánzás állatoknál és gépeknél), (Cambridge: MIT Press, 2002).

[\[326\]](#) Marc D. Hauser, Noam Chomsky és W. Tecumseh Fitch, „The Faculty of Language: What Is It, Who Has It, and How Did It Evolve?” („A nyelv képessége: mi ez?, kinek van meg? és hogy alakult ki?”), Science 298 (2002. november): 1569–79. o.

[\[327\]](#) Daniel C. Dennett, Freedom Evolves (A szabadság fejlődik), (New York: Viking, 2003).

[\[328\]](#) Lásd Sandra Blakeslee, „Humanity? Maybe It’s All in the Wiring” („Az ember? Talán az egész a huzalozáson múlik”), New York Times, 2003. december 11.

[\[329\]](#) Antonio R. Damasio, Descartes’ Error: Emotion, Reason and the Human Brain (Descartes tévedése: érzelmek, józan ész és az emberi agy), (New York: Putnam, 1994).

[\[330\]](#) M. P. Maher et al., „Microstructures for Studies of Cultured Neural Networks” („Mikrostruktúrák a tenyésztett neurális hálózatok tanulmányozásához), Medical and Biological Engineering and Computing 37.1 (1999. január): 110–18. o.; John Wright et al., „Towards a Functional MEMS Neurowell by Physiological Experimentation” („Fiziológiai kísérletekkel a funkcionális MEMS-idegkút

felé”, Technical Digest, ASME, 1996 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Atlanta, 1996. november, DSC (Dynamic Systems and Control Division), vol. 59, 333–38. o.

[\[331\]](#) W. French Anderson, „Genetics and Human Malleability” („A genetika és az emberi formálhatóság”), Hastings Center Report 23.20 (1990. január/február): 1. o.

[\[332\]](#) Ray Kurzweil, „A Wager on the Turing Test: Why I Think I Will Win” („Fogadás a Turing-tesztre: miért gondolom, hogy én fogok nyerni”), KurzweilAI.net, 2002. április 9., <http://www.kurzweilai.net/a-wager-on-the-turing-test-why-i-think-i-will-win>.

[\[333\]](#) Robert A. Freitas Jr. egy olyan jövőbeli, nanotechnológián alapuló agyfeltöltő rendszert javasol, ami gyakorlatilag azonnali működésű lenne. Freitas szerint (személyes kommunikáció, 2005. január) „egy *in vivo* neurális hálózat, ahogyan az a <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.3.1.htm> címen szerepel, 10¹⁸ bit per szekundum adatforgalmi sebességet képes kezelni, ami elég a valós idejű agyi állapot megfigyeléséhez. A vezetékhálózat térfogata 30 cm³, és 4–6 watt hőenergiát ad le, így mindkét adat elég kicsi ahhoz, hogy biztonságosan el lehessen helyezni egy 1400 cm³-es, 25 wattos emberi agyban. A jelek legfeljebb néhány métert tesznek meg fénysebességgel, tehát az átviteli idő az agyban lévő idegsejtekben keletkező jelek kiindulópontjától a külső számítógéprendszerig, ami a feltöltést lefolytatja, körülbelül 0,00001 milliszekundum, ami sokkal kisebb, mint a legalább körülbelül 5 milliszekundum idegsejt-kisülési ciklusidő. Az idegsejteket monitorozó vegyi érzékelők egymástól körülbelül 2 mikron távolságra helyezkednek el, és hozzávetőleg 5 milliszekundumon belül képesek érzékelni a fontos kémiai eseményeket, mivel nagyjából ez a diffúziós ideje például egy kis neuropeptidnek 2 mikronos távolságon át (<http://www.nanomedicine.com/>). Így az ember agyi állapotának monitorozása akár azonnali is lehet, legalábbis az ember neurális reakcióidejének skáláján, abban az értelemben, hogy »semmi fontosról nem maradnánk le«”.

[\[334\]](#) M. C. Diamond et al., „On the Brain of a Scientist: Albert Einstein” („Egy tudós agya: Albert Einstein”), Experimental Neurology 88 (1985): 198–204. o.

[\[335\]](#) Samuel Butler (1835–1902), „Darwin Among the Machines” („Darwin a gépek között”), *Christ Church Press*, 1863. június 13., (újra kiadta Festing Jones 1912-ben, in: *The Notebooks of Samuel Butler – Samuel Butler jegyzetei*).

[\[336\]](#) Peter Weibel, „Virtual Worlds: The Emperor’s New Bodies” („Virtuális világok: A császár új teste”), in *Ars Electronica: Facing the Future* (*Ars electronica: Szemben a jövővel*), szerk. Timothy Druckery (Cambridge.: MIT Press, 1999), 207–23. o.; online elérhető: http://www.aec.at/en/archiv_files/19902/EI990b_009.pdf.

[\[337\]](#) James Watson és Francis Crick, „Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid” („A nukleinsavak molekulaszervezete: a dezoxiribonukleinsav szervezete”), *Nature* 171.4356 (1953. április 23.): 737–38. o., <http://www.nature.com/nature/dna50/watsoncrick.pdf>.

[\[338\]](#) Robert Waterstont idézve in „Scientists Reveal Complete Sequence of Human Genome” („A tudósok feltárták az emberi genom teljes szekvenciáját”), *CBC News*, 2003. április 14., <http://www.cbc.ca/news/health/story/2003/04/14/genome030414.html>.

[\[339\]](#) Lásd második fejezet, [\[100\]](#) jegyzet.

[\[340\]](#) Crick és Watson eredeti jelentései, melyek ma is lenyűgöző olvasmányok, megtalálhatók in: James A. Peters, szerk., *Classic Papers in Genetics* (*Klasszikus genetikai tanulmányok*), (Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1959). Izgalmas leírás a kettős hélixhez elvezető sikerekről és kudarcokról: J. D. Watson, *The Double Helix: A Personal Account of the Discovery of the Structure of DNA* (*A kettős hélix: személyes beszámoló a DNS szerkezetének felfedezéséről*), (New York: Atheneum, 1968). A Nature.com-on megtalálható Crick cikkeinek a gyűjteménye: <http://www.nature.com/nature/focus/crick/index.html>.

[\[341\]](#) Morislav Radman és Richard Wagner, „The High Fidelity of DNA Duplication” („A DNS-duplikáció nagy pontossága”), *Scientific American* 259.2 (1988. augusztus): 40–46. o.

[\[342\]](#) A DNS és az RNS struktúrájának és viselkedésének leírása megtalálható in: Gary Felsenfeld, „DNA” („DNS”) és James Darnell, „RNA” („RNS”) című cikkeiben, mindkettő in: *Scientific American* 253.4 (1985. október), 58–67. o. és 68–78. o.

[\[343\]](#) Mark A. Iobling és Chris Tyler-Smith, „The Human Y Chromosome: An Evolutionary Marker Comes of Age” („Az emberi Y-kromoszóma: egy evolúciós marker nagykorúvá válása”), *Nature Reviews Genetics* 4 (2003. augusztus): 598–612. o.; Helen Skaletsky et al., „The Male-Specific Region of the Human Y Chromosome Is a Mosaic of Discrete Sequence Classes” („Az emberi Y-kromoszóma férfispecifikus régiója diszkrét szekvenciaosztályok mozaikja”), *Nature* 423 (2003. június 19.): 825–37. o.

[\[344\]](#) A torz fehérjék talán a legveszélyesebb toxinok. A kutatások arra utalnak, hogy a rosszul összeállt fehérjék állhatnak számos betegség hátterében. A szervezet nem képes megfelelően megsemmisíteni a torz fehérjéket, és a feltételezések szerint ez okozhatja az olyan betegségeket, mint az Alzheimer-kór, a Parkinson-kór, a kergemarhakór emberi változata, a cisztás fibrózis, a hályogok és a cukorbetegség.

A sejtek munkájának oroszlánrészét a fehérjék végzik. A fehérjék a DNS-nek megfelelően keletkeznek minden egyes sejtben. Hosszú aminosavláncokként születnek, amelyeknek aztán pontos háromdimenziós alakzatba kell rendeződniük, hogy enzimek, transzportfehérjék stb. legyenek belőlük. A nehézfém-toxinok megzavarják ezeket az enzimeket a normális működését, tovább súlyosbítva a problémát. Léteznek genetikai mutációk is, amelyek hajlamosítják az egyént a hibás fehérjék előállítására.

Amikor a protofibrillumok elkezdnek összetapadni, rostokat, szálakat, végül pedig nagyobb, globuláris struktúrákat, amyloid plakkokat

alkotnak. Egészen a közelmúltig ezeket a nem oldódó plakkefelhalmozódásokat tartották a fenti betegségek kórokozó ágensének, de ma már tudjuk, hogy maguk a protofibrillumok jelentik a valódi problémát. Az a sebesség, amivel egy protofibrillumból nem oldódó amyloid plakk lesz, fordítottan arányos a betegség előrehaladásával. Ez megmagyarázza, miért nem mutatnak feltétlenül Alzheimer-kórra utaló tüneteket olyanok, akiknek az agyában kiterjedt plakkefelhalmozódásokat találnak, és miért jelentkezik a betegség másoknál, akiknek alig található látható plakk az agyában. Vannak, akiknél gyorsan alakulnak ki az amyloid plakkok, és ez megóvjá őket a további protofibrillumkárosodástól. Másoknál a protofibrillumok lassan alakulnak át amyloid plakkokká, és így nagyobb lesz a károsodás. Náluk kevesebb a látható plakk mennyisége is. Lásd Per Hammarström, Frank Schneider és Jeffrey W. Kelly, „Trans-Suppression of Misfolding in an Amyloid Disease” („A hibás fehérjekeletkezés transz-szuppressziója egy amyloid betegségnél”), *Science* 293.5539 (2001. szeptember 28.): 2459–62. o.

[\[345\]](#) Az új biológia lenyűgöző bemutatását lásd: Horace F. Judson, *The Eighth Day of Creation: The Makers of the Revolution in Biology (A teremtés nyolcadik napja: a biológia forradalmának teremtői)*, (Woodbury: CSHL Press, 1996).

[\[346\]](#) Raymond Kurzweil és dr. Terry Grossman, *Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever* (Fantasztikus utazás: élj olyan sokáig, hogy örökké élj!), (New York: Rodale, 2004). Lásd <http://www.Fantastic-Voyage.net> és <http://www.RayandTerry.com>.

[\[347\]](#) Raymond Kurzweil, *The 10% Solution for a Healthy Life: How to Eliminate Virtually All Risk of Heart Disease and Cancer (A 10%-os megoldás az egészséges életre: hogyan szüntessük meg a szívbetegség és a rák gyakorlatilag összes kockázatát?)*, (New York: Crown Books, 1993).

[\[348\]](#) Kurzweil és Grossman, *Fantastic Voyage (Fantasztikus utazás)*. „Ray & Terry’s Longevity Program” („Ray és Terry hosszúélet-programja”) kerül kifejtésre a könyvben.

[\[349\]](#) A „biológiai kor” tesztje, a H-szken-teszt során méri a hallási reakcióidőt, a legmagasabb hallott hangot, a vibrotaktilis érzékenységet, a vizuális reakcióidőt, az izommozgás-időt, a tüdőkapacitást, a vizuális reakcióidőt döntéssel, az izommozgás-időt döntéssel, az emlékezetet (sorozathossz), a gombnyomás válaszidőt és a vizuális felismerést. A szerző a Frontier Medical Institute-ban (Grossman egészség- és hosszú élet klinikáján) végezte el ezeket a teszteket, <http://www.FMIClinic.com>. A H-szken-tesztről részletesebben lásd <http://www.lidhealth.com/>, Diagnostic and Lab Testing, Longevity Institute, Dallas.

[\[350\]](#) Kurzweil és Grossman, *Fantastic Voyage (Fantasztikus utazás)*, 10. fejezet: „Ray’s Personal Program” („Ray személyi programja”).

[\[351\]](#) Uo.

[\[352\]](#) Aubrey D. N. J. de Grey, „The Foreseeability of Real Anti-Aging Medicine: Focusing the Debate” („A valódi öregedésgátló gyógyászat előreláthatósága: a vita fókuszálása), *Experimental Gerontology* 38.9 (2003. szeptember): 927–34. o.; Aubrey D. N. J. de Grey, „An Engineer’s Approach to the Development of Real Anti-Aging Medicine” („A valódi öregedésgátló gyógyászat kifejlesztése mérnöki szempontból”), *Science of Aging, Knowledge, Environment* 1 (2003): Aubrey D. N. J. de Grey et al., „Is Human Aging Still Mysterious Enough to Be Left Only to Scientists?” („Még mindig elég rejtélyes az emberi öregedés ahhoz, hogy csak a tudósokra hagyjuk?”), *BioEssays* 24.7 (2002. július): 667–76. o.

[\[353\]](#) Aubrey D. N. J. de Grey, szerk., *Strategies for Engineered Negligible Senescence: Why Genuine Control of Aging May Be Foreseeable (Az elhanyagolható mértékű öregedést célzó stratégiák: miért előrejelezhető az öregedés tényleges szabályozása?)*, *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1019 (New York: New York Academy of Sciences, 2004. június).

[\[354\]](#) Amellett, hogy biztosítja a különféle sejtek funkcióit, két ok szól még a gének expressziójának sejtek általi kontrollja mellett: a környezeti hatások és a fejlődési folyamatok. Még az olyan egyszerű organizmusok, mint a baktériumok is képesek ki- és bekapcsolni a fehérjeszintézist a környezeti hatások függvényében. Például az *E. coli* képes kikapcsolni azoknak a fehérjéknek a szintézisét, amelyek lehetővé teszik, hogy szabályozza a levegőből felvett nitrogén mennyiségét, amikor rendelkezésre állnak más, kevésbé energiaigényes nitrogénforrások is a környezetben. Egy 1800 epergében végzett kutatás a közelmúltban kimutatta, hogy 200 gén expressziója megváltozott a különböző fejlődési szakaszokban. E. Marshall, „An Array of Uses: Expression Patterns in Strawberries, Ebola, TB, and Mouse Cells” („A felhasználási lehetőségek skálája: expressziómintázatok az eperben, az ebolában, a TBC-ben és az egérsejtekben”), *Science* 286.5439 (1999): 445. o.

[\[355\]](#) A géneknek a fehérjéket kódoló területeik mellett vannak szabályozó szekvenciák is, a promóterek és enhancerek, amelyek azt szabályozzák, hogy hol és mikor történjen a génexpresszió. A fehérjéket kódoló promóterek általában közvetlenül „felfelé” helyezkednek el a DNS-en. Egy enhancer aktiválja egy promóter használatát, és szabályozza ezzel a génexpresszió sebességét. A legtöbb génnek enhancerre van szüksége az expresszióhoz. Az enhancerek „a tér (sejtípus) és időbeli differenciális transzkripció fő meghatározói”, és bármelyik génhez több különböző enhancertelep kapcsolódhat (S. F. Gilbert, *Developmental Biology (Fejlődésbiológia)*, 6. kiadás, szerk. [Sunderland.: Sinauer Associates, 2000]).

Azzal, hogy enhancer- vagy promóterrégiókhoz kapcsolódnak, a transzkripciós faktorok beindítják vagy elnyomják a gén expresszióját. A transzkripciós faktorokról szerzett új ismereteink átalakították a génexpresszióról alkotott elképzeléseinket. Gilber így ír a „The Genetic Core of Development: Differential Gene Expression” („A fejlődés genetikai magja: a differenciális génexpresszió”) című részben: „Magát a gént már nem önálló entitásnak tekintjük, ami a fehérjeszintézist szabályozza. A gén egyszerre szabályozza a fehérjeszintézist

és van irányítva azáltal. Natalie Anger (1992) írta: »Egy sor felfedezés utal arra, hogy a DNS nagyon hasonló egy bizonyos fajta politikushoz, akit a proteinsegítők és -tanácsadók falkája vesz körül, akiknek erősen masszírozniuk kell, rázogatniuk és időnként megújítaniuk ahhoz, hogy a test általános tervrajza egyáltalán bármiféle értelemmel bírjon.«

[\[356\]](#) Bob Holmes, „Gene Therapy May Switch Off Huntington’s” („A génterápia kikapcsolhatja a Huntingtont”), 2003. március 13., <http://www.newscientist.com/article/dn3493-gene-therapy-may-switch-off-huntingtons.html>. „Az RNSi-t, ami a fordított génanalízis hatékony eszközeként alakult, egyre gyakrabban alkalmazzák az emberi betegségekhez köthető számos gén tanulmányozásában, különös tekintettel azokra, amelyek az onkogenezissel és a fertőző betegségekkel vannak kapcsolatban.” J. C. Cheng, T. B. Moore és K. M. Sakamoto, „RNA Interference and Human Disease” („Az RNS-interferencia és az emberi betegségek”), *Molecular Genetics and Metabolism* 80.1–2 (2003. október): 121–28. o. Az RNSi „erős és igen szekvencia-specifikus mechanizmus”, I. Zhang, D. K. Fogg és D. M. Waisman, „RNA Interference-Mediated Silencing of the S100A10 Gene Attenuates Plasmin Generation and Invasiveness of Colo 222 Colorectal Cancer Cells” („Az S100A10 gén RNS-interferencia-mediált elnémítása csökkenti a Colo 222 Colorectal ráksejtek plazmingenerációját és invazivitását”), *Journal of Biological Chemistry* 279.3 (2004. január 16.): 2053–62. o.

[\[357\]](#) Mindegyik chipben szintetikus oligonukleotidok vannak, amelyek replikálják az egyes géneket azonosító szekvenciákat. „Annak a meghatározásához, hogy mely gének expressziója történt meg egy mintában, a kutatók izolálják a hírvívő RNS-t a mintákból, átalakítják komplementer DNS-sé (cDNS), megfestik fluoreszkáló festékkel, és felhordják a lapkára. A megfestett cDNS-ek hozzá fognak tapadni egy oligóhoz, aminek azonos a szekvenciája, kivilágítva a helyet a lapkán. Ezután egy automata szkennel meg határozza, melyik oligóknál történt kötés, azaz mely géneknél történt expresszió...” E. Marshall, „Do-It-Yourself Gene Watching” („Csináld magad génfigyelés”), *Science* 286.5439 (1999. október 15.): 444–47. o.

[\[358\]](#) Uo.

[\[359\]](#) J. Rosamond és A. Allsop, „Harnessing the Power of the Genome in the Search for New Antibiotics” („A genom erejének felhasználása az új antibiotikumok keresésében”), *Science* 287.5460 (2000. március 17.): 1973–76. o.

[\[360\]](#) T. R. Golub et al., „Molecular Classification of Cancer: Class Discovery and Class Prediction by Gene Expression Monitoring” („A rák molekuláris osztályozása: osztályfelfedezés és osztály-előrejelzés génexpresszió-figyelés alapján”), *Science* 286.5439 (1999. október 15.): 531–37. o.

[\[361\]](#) Uo., ahogy idézi A. Berns, „Cancer: Gene Expression in Diagnosis” („Rák: génexpresszió a diagnózisban”), *Nature* 403 (2000. február 3.): 491–92. o. Egy másik kutatásban a tanulmányozott gének egy százaléka csökkent expressziót mutatott az idős izmokban. Ezek a gének az energiatermeléssel és sejtépítéssel kapcsolatba hozott fehérjéket állítottak elő, tehát a csökkenés logikus, tekintettel az öregedéssel együtt járó gyengülésre. A megnövekedett expressziójú gének stresszfehérjéket termeltek, amelyeket a sérült DNS vagy fehérjék kijavítására használ a szervezet. J. Marx, „Chipping Away at the Causes of Aging” („Az öregedés okainak fokozatos megszüntetése”), *Science* 287.5462 (2000. március 31.): 2390. o.

Egy másik példa: a májjáttét gyakori oka a colorectalis rák kialakulásának. Ezek az áttétek a genetikai profiljuktól függően másképp reagálnak a kezelésre. Az expresszió profilozása kiváló módszer a helyes kezelés meghatározására. J. C. Sung et al. „Genetic Heterogeneity of Colorectal Cancer Liver Metastases” („A colorectalis rák májjáttétjének genetikai heterogenitása”), *Journal of Surgical Research* 114.2 (2003. október): 251. o.

Végül még egy példa: a kutatók nehezen tudták analizálni a Hodgkin-kór Reed–Sternberg-sejtjét, mivel nagyon kevés található belőle a beteg szövetben. Az expresszió-profilozás ma sok mindent elárul a sejt leszármazásáról. J. Cossman et al., „Reed-Sternberg Cell Genome Expression Supports a B-Cell Lineage” („A Reed–Sternberg-sejt genomexpressziója B-sejt leszármazásra utal”), *Blood* 94.2 (1999. július 15.): 411–16. o.

[\[362\]](#) T. Ueland et al., „Growth Hormone Substitution Increases Gene Expression of Members of the IGF Family in Cortical Bone from Women with Adult Onset Growth Hormone Deficiency – Relationship with Bone Turn-Over” („A növekedési hormon pótlása fokozza a génexpressziót az IGF család tagjaiban a felnőtt növekedési hormon hiányában szenvedő nők kortikális csontjában – a kapcsolat a csonttal megfordul”), *Bone* 33.4 (2003. október): 638–45. o.

[\[363\]](#) R. Lovett, „Toxicologists Brace for Genomics Revolution” („A toxikológusok üdvözlik a genetikai forradalmat”), *Science* 289.5479 (2000. július 28.): 536–37. o.

[\[364\]](#) A szomatikus sejtekbe történő géntranszfer egy ideig számos egyéb sejtre is hatást gyakorol. Elméletileg lehetséges megváltoztatni a genetikai információt a petesejtben és a hímivarsejtben (a csíravonalsejtekben) azzal a céllal, hogy a változások átkerüljenek a következő nemzedékbe. Ez a terápia számos etikai kérdést felvet, és még nem került alkalmazásra. Wikipedia, „Gene Therapy”, http://en.wikipedia.org/wiki/Gene_therapy.

[\[365\]](#) A gének fehérjéket kódolnak, amelyek létfontosságú feladatokat látnak el az emberi testben. Az abnormális vagy mutálódott gének olyan fehérjéket kódolnak, amelyek nem képesek ellátni ezeket a feladatokat, és így genetikai rendellenességeket és betegségeket okoznak. A génterápia célja az, hogy kicserélje a defektív géneket, és normális fehérjék jöjjenek létre. Ez sokféleképpen megvalósítható, de a legáltalánosabb módszer az az, hogy egy hordozómolekulával, vektorral, beültetnek egy terápiás pótló gént a páciens kiszemelt sejtjeibe. „Jelenleg a leggyakoribb vektor egy vírus, amit genetikailag módosítottak, hogy képes legyen a normális emberi DNS

hordozására. A vírusok kifejlesztettek egy módszert arra, hogy patogénikus módon körbezárják és bevigyék génjeiket az emberi sejtekbe. A tudósok ezt a képességüket próbálják meg kihasználni, eltávolítva a vírus genomjából a kórokozó géneket, és terápiás géneket ültetve a helyükbe.” (Human Genome Project, „Gene Therapy”, http://www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/medicine/genetherapy.shtml). A génterápiát és további hivatkozásokat illetően lásd a Human Genom Projekt honlapját. A génterápia olyan fontos kutatási terület, hogy jelenleg hat szakértői bírálattal dolgozó periodika jelenik meg a témában, és négy szakmai szervezet tevékenykedik rajta.

[\[366\]](#) K. R. Smith, „Gene Transfer in Higher Animals: Theoretical Considerations and Key Concepts” („Génátültetés magasabb rendű állatokban: elméleti megfontolások és kulcsfogalmak”), *Journal of Biotechnology* 99.1 (2002. október 9.): 1–22. o.

[\[367\]](#) Anil Ananthaswamy, „Undercover Genes Slip into the Brain” („Álcázott gének lopóznak az agyba”), 2003. március 20., <http://www.newscientist.com/article/dn3520-undercover-genes-slip-into-the-brain.html>.

[\[368\]](#) A. E. Trezise et al., „In Vivo Gene Expression: DNA Electrotransfer” („In vivo génexpresszió: DNS-elektrotranszfer”), *Current Opinion in Molecular Therapeutics* 5.4 (2003. augusztus): 397–404. o.

[\[369\]](#) Sylvia Westphal, „DNA Nanoballs Boost Gene Therapy” („DNS-nanolabdák erősítik a génterápiát”), 2002. május 12., <http://www.newscientist.com/article/dn2257-dna-nanoballs-boost-gene-therapy.html>.

[\[370\]](#) L. Wu, M. Johnson és M. Sato, „Transcriptionally Targeted Gene Therapy to Detect and Treat Cancer” („Transzkripcionálisan célzott génterápia a rák felfedezésére és kezelésére”), *Trends in Molecular Medicine* 9.10 (2003. október): 421–29. o.

[\[371\]](#) S. Westphal, „Virus Synthesized in a Fortnight” („Két hét alatt szintetizált vírus”), 2003. november 14., <http://www.newscientist.com/article/dn4383-virus-synthesised-in-a-fortnight.html>.

[\[372\]](#) G. Chiesa, „Recombinant Apolipoprotein A-I(Milano) Infusion into Rabbit Carotid Artery Rapidly Removes Lipid from Fatty Streaks” („A nyulak nyaki artériájába fecskendezett rekombináns apolipoprotein A-I(Milano) gyorsan eltávolítja a lipidet a zsíros erekből”), *Circulation Research* 90.9 (2002. május 17.): 974–80. o.; P. K. Shah et al., „High-Dose Recombinant Apolipoprotein A-I(Milano) Mobilizes Tissue Cholesterol and Rapidly Reduces Plaque Lipid and Macrophage Content in Apolipoprotein e-Deficient Mice” („A nagy dózisú rekombináns apolipoprotein A-I Milano mozgósítja a szövetekben a koleszterint, és gyorsan csökkenti a lipidplakkokat és a makrofágokat az E-deficiens egerekben”), *Circulation* 103.25 (2001. június 26.): 3047–50. o.

[\[373\]](#) S. E. Nissen et al., „Effect of Recombinant Apo A-I Milano on Coronary Atherosclerosis in Patients with Acute Coronary Syndromes: A Randomized Controlled Trial” („A rekombináns Apo A-I Milano hatása az akut szívkoszorúér-problémákban szenvedő páciensek érlelmeszedésére: randomizált ellenőrzött vizsgálat”), *JAMA* 290.17 (2003. november 5.): 2292–2300. o.

[\[374\]](#) Egy közelmúltbeli, 2. fázisbeli kutatás „jelentősen megnövekedett HDL és csökkenő LDL koleszterinszintről” számolt be. M. E. Brousseau et al., „Effects of an Inhibitor of Cholesteryl Ester Transfer Protein on HDL Cholesterol” („A koleszterinészter-transzferprotein egy inhibitorának hatása a HDL-koleszterinre”), *New England Journal of Medicine* 350.15 (2004. április 8.): 1505–15. o., <http://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMoa031766>. A 3. fázisú próbák világszerte 2003 végén kezdődtek. További információk a Torcetrapibról a Pfizer honlapján: <http://www.pfizer.com/>.

[\[375\]](#) O. J. Finn, „Cancer Vaccines: Between the Idea and the Reality” („Rákvakcinák: az ötlet és a valóság között”), *Nature Reviews: Immunology* 3.8 (2003. augusztus): 630–41. o.; R. C. Kennedy és M. H. Shearer, „A Role for Antibodies in Tumor Immunity” („Az antitestek szerepe a tumorimmunitásban”), *International Reviews of Immunology* 22.2 (2003. március–április): 141–72. o.

[\[376\]](#) T. F. Greten és E. M. Jaffee, „Cancer Vaccines” („Rákvakcinák”), *Journal of Clinical Oncology* 17.3 (1999. március): 1047–60. o.

[\[377\]](#) „Cancer ‘Vaccine’ Results Encouraging” („Biztató eredmények a »rákvakcinák« terén”), *BBC News*, 2001. január 8., <http://news.bbc.co.uk/2/hi/health/1102618.stm>, beszámoló E. M. Jaffee et al. kutatásáról: „Novel Allogeneic Granulocyte-Macrophage Colony-Stimulating Factor-Secreting Tumor Vaccine for Pancreatic Cancer: A Phase I Trial of Safety and Immune Activation” (Új allogén granulocita-makrofág kolónia stimuláló faktort termelő tumorvakcina hasnyálmirigyrákhoz: I-es fázisú vizsgálat, biztonság és immunaktiváció), *Journal of Clinical Oncology* 19.1 (2001. január 1): 145–56. o.

[\[378\]](#) John Travis, „Fused Cells Hold Promise of Cancer Vaccines” („Az egybeolvadott sejtek a rák vakcinájának ígértét hordozzák”), 2000. március 4., http://www.sciencenews.org/view/generic/id/240/description/Fused_cells_hold_promise_of_cancer_vaccines, D. W. Kufe, „Smallpox, Polio and Now a Cancer Vaccine?” („Himlő, gyermekbénulás, és most rákvakcina?”), *Nature Medicine* 6 (2000. március): 252–53. o., című cikkére hivatkozva.

[\[379\]](#) J. D. Lewis, B. D. Reilly és R. K. Bright, „Tumor-Associated Antigens: From Discovery to Immunity” („Tumorról kapcsolatos antigének: a felfedezéstől az immunitásig”), *International Reviews of Immunology* 22.2 (2003. március–április): 81–112. o.

[\[380\]](#) T. Boehm et al., „Antiangiogenic Therapy of Experimental Cancer Does Not Induce Acquired Drug Resistance” („A kísérleti

rák antiangiogenikus terápiája nem utal szerzett gyógyszerellenállásra”), *Nature* 390.6658 (1997. november 27.): 404–7. o.

[\[381\]](#) Angiogenesis Foundation, „Understanding Angiogenesis” („Az angiogenezis megértése”), http://www.angio.org/understanding/content_understanding.html, L. K. Lassiter és M. A. Carducci, „Endothelin Receptor Antagonists in the Treatment of Prostate Cancer” („Endotelinreceptor-antagonisták prosztatarák kezelésében”), *Seminars in Oncology* 30.5 (2003. október): 678–88. o. A folyamat magyarázatát lásd a National Cancer Institute weblapján: „Understanding Angiogenesis”, <http://www.cancer.gov/cancertopics/understandingcancer/angiogenesis>.

[\[382\]](#) I. B. Roninson, „Tumor Cell Senescence in Cancer Treatment” („A ráksejtek öregedése a rák kezelésében”), *Cancer Research* 63.11 (2003. június 1.): 2705–15. o.; B. R. Davies et al., „Immortalization of Human Ovarian Surface Epithelium with Telomerase and Temperature-Sensitive SV40 Large T Antigen” („Az emberi petefészkek hámszövete felszínének halhatatlanná tétele telomerázzal és hőmérséklet-érzékeny SV40 nagy T-antigénnel”), *Experimental Cell Research* 288.2 (2003. augusztus 15.): 390–402. o.

[\[383\]](#) Lásd még R. C. Woodruff és J. N. Thompson Jr., „The Role of Somatic and Germline Mutations in Aging and a Mutation Interaction Model of Aging” („A szomatikus és csíravonali mutációk szerepe az öregedésben, és az öregedés mutációs interakciós modellje”), *Journal of Anti-Aging Medicine* 6.1 (2003. Spring): 29–39. o. Lásd még [\[352\]](#) és [\[353\]](#) jegyzet.

[\[384\]](#) Aubrey D. N. J. de Grey, „The Reductive Hotspot Hypothesis of Mammalian Aging: Membrane Metabolism Magnifies Mutant Mitochondrial Mischief” („Az emlősök öregedésének reduktív túlmelegedési hipotézise: a sejthártya anyagcseréje felerősíti a mutáns mitokondrium kártékony hatását”), *European Journal of Biochemistry* 269.8 (2002. április): 2003–9. o.; P. F. Chinnery et al., „Accumulation of Mitochondrial DNA Mutations in Ageing, Cancer, and Mitochondrial Disease: Is There a Common Mechanism?” („A mitokondriális DNS-mutációk felhalmozódása az öregedés, a rák és a mitokondriális betegség esetében: ugyanaz a mechanizmus?”), *Lancet* 360.9342 (2002. október 26.): 1323–25. o.; A. D. de Grey, „Mitochondrial Gene Therapy: An Arena for the Biomedical Use of Inteins” („Mitokondriális génterápia: lehetőség az inteinek biomedikai felhasználására”), *Trends in Biotechnology* 18.9 (2000. szeptember): 394–99. o.

[\[385\]](#) „Az az elképzelés, hogy »beoltsuk« az embereket olyan neurodegeneratív rendellenességek ellen, mint az Alzheimer-kór, jelentős eltávolodás a betegség mechanizmusának és kezelésének a klasszikus felfogásától, mégis mind az Alzheimer-kór, mind a szklerózis multiplex terápiás vakcinái működőképesnek bizonyultak az állakísérletek során, és jelenleg a klinikai tesztelés szakaszában vannak. Ugyanakkor ennek a megközelítésnek megvan az a veszélye, hogy nemkívánatos gyulladásos reakciót vált ki a jótékony hatásai mellett.” (H. L. Weiner és D. J. Selkoe, „Inflammation and Therapeutic Vaccination in CNS Diseases” („Gyulladás és terápiás védőoltás a CNS-betegségek esetében”), *Nature* 420.6917 [2002. december 19–26.]: 879–84. o.). A kutatók kimutatták, hogy az orrcsepp formájában alkalmazott vakcina lelassíthatja az agyi leépülést az Alzheimer-kór esetében. H. L. Weiner et al., „Nasal Administration of Amyloid-beta Peptide Decreases Cerebral Amyloid Burden in a Mouse Model of Alzheimer’s Disease” („Az orron keresztül alkalmazott amyloid-béta peptid csökkenti az agyi amyloidterhelést az Alzheimer-kór egérmodelljében”), *Annals of Neurology* 48.4 (2000. október): 567–79. o.

[\[386\]](#) S. Vasan, P. Foiles és H. Founds, „Therapeutic Potential of Breakers of Advanced Glycation End Product-Protein Crosslinks” („Előrehaladott glikációs végtermékekben protein-keresztkapcsolatok felbontóinak terápiás lehetőségei”), *Archives of Biochemistry and Biophysics* 419.1 (2003. november 1.): 89–96. o.; D. A. Kass, „Getting Better Without AGE: New Insights into the Diabetic Heart” („Jobbulás öregedés nélkül: új felismerések a cukorbeteg szív területén”), *Circulation Research* 92.7 (2003. április 18.): 704–6. o.

[\[387\]](#) S. Graham, „Methuselah Worm Remains Energetic for Life” („A matuzsálemkorú féreg egész életében energikus marad”), 2003. október 27., <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=methuselah-worm-remains-e>.

[\[388\]](#) Ron Weiss honlapja (<http://groups.csail.mit.edu/synbio/publications/>) felsorolja a publikációit, például a „Genetic Circuit Building Blocks for Cellular Computation, Communications, and Signal Processing” („Genetikai áramkör építőelemei a sejtszintű számításokhoz, kommunikációhoz és jelfeldolgozáshoz”), *Natural Computing, an International Journal* 2.1 (2003. január): 47–84. o.

[\[389\]](#) S. L. Garfinkel, „Biological Computing” („Biológiai számítástechnika”), *Technology Review* (2000. május–június), <http://static.highbeam.com/t/technologyreview/may012000/biologicalcomputing>.

[\[390\]](#) Uo. Lásd még a jelenleg folyó kutatások listáját a MIT Media Lab honlapján, <http://www.media.mit.edu/research/>.

[\[391\]](#) Egy lehetséges magyarázat: „Az emlősök nőnemű embrióinak két X-kromoszómája van, a hímneműeknek egy. A nőneműek korai fejlődési szakaszában az egyik X-kromoszóma és a génjei nagy része általában elnémul vagy inaktívvá válik. Így a nő- és hímnemű egyedek esetében ugyanakkora lesz a génexpresszió. Ám a klónozott állatoknál az egyik X-kromoszóma már inaktív a donorsejtmagban. Át kell programozni és később újra inaktíválni kell, ami magában hordozza a hibák lehetőségét.” *CBC News online*, „Genetic Defects May Explain Cloning Failures” („Genetikus defektusok magyarázhatják a klónozás kudarcait”), 2002. május 27., http://www.cbc.ca/news/story/2002/05/27/cloning_errors020527.html. A cikk F. Xue et al., „Aberrant Patterns of X Chromosome Inactivation in Bovine Clones” („Az X kromoszóma inaktíválásának aberrált mintázatai szarvasmarha-klónokban”), *Nature Genetics* 31.2 (2002. június): 216–20. o. c. tanulmányára hivatkozik.

[\[392\]](#) Rick Weiss, „Clone Defects Point to Need for 2 Genetic Parents” („A klónozás hibái arra utalnak, hogy két genetikai szülőre

van szükség”), *Washington Post*, 1999. május 10., <http://www.gene.ch/genet/1999/Jun/msg00004.html>.

[393] A. Baguisi et al., „Production of Goats by Somatic Cell Nuclear Transfer” („Kecskek létrehozása szomatikus sejtmag átültetésével”), *Nature Biotechnology* 5 (1999. május): 456–61. o. A Genzyme Transgenics Corporation, a Louisiana Állami Egyetem és a Tufts Orvosi Egyetem közötti együttműködésről, aminek keretében ez a munka létrejött, lásd az 1999. április 27-i sajtóközleményt: „Genzyme Transgenics Corporation Announces First Successful Cloning of Transgenic Goat” („A Genzyme Transgenics Corporation bejelentése az első sikeres kecskeklónozásról”), <http://www.transgenics.com/pressreleases/pr042799.html>.

[394] Luba Vangelova, „True or False? Extinction Is Forever” („Igaz vagy hamis? A kihalás örökre szól”), *Smithsonian*, 2003. június, <http://www.smithsonianmag.com/smithsonian/issues03/jun03/phenomena.html>.

[395] J. B. Gurdon és A. Colman, „The Future of Cloning” („A klónozás jövője”) *Nature* 402.6763 (1999. december 16.): 743–46. o.; Gregory Stock és John Campbell, szerk., *Engineering the Human Germline: An Exploration of the Science and Ethics of Altering the Genes We Pass to Our Children* (Az emberi csíravonal módosítása: a gyermekeinknek átadott gének megváltoztatásának tudománya és etikája), (New York: Oxford University Press, 2000).

[396] Ahogyan a Scripps Kutatóintézet rámutat: „Az öröklődésben szerepet kapó sejtek multipotens elődsejteké váló dedifferenciálásra vagy visszafordításra való képesség számos, az ESC-k és felnőtt őssejtek alkalmazásával kapcsolatos nehézséget legyőzhet a klinikai alkalmazás területén (nem hatékony differenciálás, az allogén sejtek kilökése, hatékony elszigetelés és kiterjesztés stb.) A hatékony dedifferenciáló folyamat birtokában elképzelhető, hogy nagyszámú és könnyen hozzáférhető egészséges felnőtt sejt felhasználásával hozunk létre különböző funkciójú sejteket a sérült szövetek és szervek meggyógyítására.”

Egy differenciált sejttípus közvetlen átalakítása egy másikká – a transzdedifferenciálás – hasznos lenne abból a szempontból, hogy izogén sejteket (a beteg saját sejtjeit) lehetne előállítani a beteg vagy sérült sejtek és szövetek pótlására. A felnőtt őssejtek tágabb differenciálódási potenciállal rendelkeznek, mint hittük, és más szöveteket is felépíthetnek, mint azt, amelyikből származnak. Így pedig értékes terápiás ágensek lehetnek. A transzdedifferenciálás legújabb fejleményei között megtaláljuk a sejtmagátültetést, a sejtkultúra körülményeinek változtatását, az ektópiás génexpresszió kiváltását, és molekulák kivonását a sejtnedvekből. Ezek a módszerek kaput nyitnak az izogén pótsejtek tervezésének új útjaira. A kiszámíthatatlan szövetátalakulás elkerülése érdekében a sejtmag átprogramozásához kontrollált és örökölhető epigenetikus módosítások szükségesek. A sejtmag-átprogramozás mélyén rejlő molekuláris szintű folyamatok feltárására még további erőfeszítéseket kell fordítani, és fel kell mérni az átprogramozott sejtek stabilitását.

Idézve: P. Collas és Anne-Marie Hakelien, „Teaching Cells New Tricks” („Új trükkök tanítása a sejteknek”), *Trends in Biotechnology* 21.8 (2003. augusztus): 354–61. o.; P. Collas, „Nuclear Reprogramming in Cell-Free Extracts” („Sejtmag-átprogramozás sejtmentes extraktumokban”), *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B* 358.1436 (2003. augusztus 29.): 1389–95. o.

[397] A kutatók laboratóriumi körülmények között átváltoztattak már emberi májsejteket hasnyálmirigysejteké: Jonathan Slack et al., „Experimental Conversion of Liver to Pancreas” („Máj kísérleti átváltoztatása hasnyálmiriggyé”), *Current Biology* 13.2 (2003. január): 105–15. o. A kutatók sejtextraktum használatával átprogramoztak sejteket, hogy más sejtek módjára viselkedjenek, például hámsejteket úgy, hogy T-sejtek jellemzőit vegyék fel. Anne-Marie Hakelien et al., „Reprogramming Fibroblasts to Express T-Cell Functions Using Cell Extracts” („Fibroblasztok átprogramozása sejtextraktumokkal T-sejt-funkciók felmutatására”), *Nature Biotechnology* 20.5 (2002. május): 460–66. o.; Anne-Marie Hakelien és P. Collas, „Novel Approaches to Transdifferentiation” („Új módszerek a transzdedifferenciálásban”), *Cloning Stem Cells* 4.4 (2002): 379–87. o. Lásd még David Tosh és Jonathan M. W. Slack, „How Cells Change Their Phenotype” („Hogyan változtatják meg a sejtek a fenotípusukat?”), *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 3.3 (2002. március): 187–94. o.

[398] Lásd a transzkripció faktorok leírását fentebb, a **[355]** jegyzetben.

[399] R. P. Lanza et al., „Extension of Cell Life-Span and Telomere Length in Animals Cloned from Senescent Somatic Cells” („Sejtéletréteg és telomerhossz kiterjesztése idős szomatikus sejtekből klónozott állatokban”), *Science* 288.5466 (2000. április 28.): 66–9. o. Lásd még J. C. Ameisen, „On the Origin, Evolution, and Nature of Programmed Cell Death: A Timeline of Four Billion Years” („A programozott sejthalál eredetéről, evolúciójáról és jellegéről: négy milliárd éves idővonal”), *Cell Death and Differentiation* 9.4 (2002. április): 367–93. o.; Mary-ellen Shay, „Transplantation Without a Donor” („Szervátültetés donor nélkül”), *Dream: The Magazine of Possibilities* (Children’s Hospital, Boston), Fall 2001.

[400] 2000-ben az Immune Tolerance Network (<http://www.immunetolerance.org>), a National Institutes of Health (NIH) és a Juvenile Diabetes Foundation projektje bejelentette, hogy több helyen megkezdődtek a szigetsejt-átültetés hatékonyságát felmérő klinikai próbák.

Egy klinikai próba összefoglalója szerint (James Shapiro, „Campath-1H and One-Year Temporary Sirolimus Maintenance Monotherapy in Clinical Islet Transplantation” [„A Campath-1H és az egy évig tartó Sirolimus monoterápia a klinikai szigetsejt-átültetésben”]), „A rák hosszú távú kockázata, az életveszélyes fertőzések lehetősége és a kilökődést gátló terápia gyógyszer-mellékhatásai miatt ez a terápia nem alkalmas minden egyes típusú cukorbetegségben szenvedő betegnek, még ha nincs is korlátozva a szigetsejt-ellátás. Ha minimális kockázattal elérhető a tolerancia (a beültetett szerv tartós működése a kilökődést gátló gyógyszerek hosszú távon történő alkalmazása nélkül), akkor a cukorbetegség kezdeti szakaszában, illetve gyermekeknél a diagnózist követően

alkalmazható lehet a szigetsejt-átültetés.”

[\[401\]](#) „Lab Grown Steaks Nearing Menu” („Hamarosan feltűnik az étlapon a laboratóriumban növesztett bélszín”), <http://www.newscientist.com/article/dn3208-labgrown-steaks-nearing-the-menu.html>, a technikai problémák tárgyalásával.

[\[402\]](#) A csíkszélesség felezési ideje öt év minden dimenzióban. Lásd második fejezet.

[\[403\]](#) Robert A. Freitas Jr. elemzéséből kiderül, hogy ha egy személy vörösvértestjeinek tíz százalékát respirocita robotokkal helyettesítenénk, akkor az illető körülbelül négy órán keresztül vissza tudná tartani a lélegzetét, azaz 240-szer hosszabb ideig, mint az egy perc (körülbelül eddig lehetséges csak biológiai vörösvértestekkel). Mivel ehhez a növekedéshez csak a vörösvértestek tíz százalékát kellene lecserélni, a respirociták ezerszer hatékonyabbak a biológiai vörösvértesteknél.

[\[404\]](#) A nanotechnológia „az anyag struktúrájának teljes és olcsó ellenőrzése a termékek és melléktermékek, a molekuláris gyártás termékeinek és folyamatainak, beleértve a molekuláris gépezetet is, molekuláris szintű kontrollja révén”. (Eric Drexler és Chris Peterson, *Unbounding the Future: The Nanotechnology Revolution (A jövő felszabadítása: a nanotechnológiai forradalom)*, [New York: William Morrow, 1991]). A szerzők szerint:

A technológia évezredek óta az anyag szerkezetének nagyobb kontrollja felé tart... A múlt fejlett technológiái – a mikrohullámú csövek, a lézerek, a szupravezetők, a műholdak, a robotok és a többi – éppen csak csordogáltak a gyárakból, eleinte drágán és szűk alkalmazási területen. A molekuláris gyártás viszont sokkal inkább a számítógépekre fog hasonlítani: rugalmas technológia, kiterjedt alkalmazási területtel. A molekuláris gyártás termékei nem hagyományos gyárakból fognak csordogálni, mint a számítógépek; át fogják venni a gyárak helyét, át fogják venni a termékek helyét. Ez alapjaiban jó dolog, nem csak egy újabb XX. századi bigyó. A tudomány XXI. századi trendjeiből fog kinőni, de meg fogja törni a technológiai, gazdasági és környezeti trendvonalakat. [1. fejezet]

Drexler és Peterson felvázolja a forradalom lehetséges hatásainak hatókörét: hatékony napelemek, „amelyek olyan olcsók, mint az újságpapír, és olyan kemények, mint az aszfalt”, molekuláris gépezetek, amik hat óra alatt képesek végezni a náthavírusokkal, majd biológiailag lebomlanak, immungépezetek, amelyek egy gombnyomásra elpusztítják a testben lévő rosszindulatú sejteket, zseb-szuperszámítógépek, a fosszilis energiahordozók használatának a vége, űrutazás és a kihalt fajok feltámasztása. Lásd még E. Drexler, *Engines of Creation (A teremtés motorjai)*, (New York: Anchor Books, 1986). A Foresight Intézetnek van egy hasznos listája a nanotechnológiával kapcsolatban gyakran ismételt kérdésekről (<http://www.foresight.org/nano/whatisnano.html>), és számos egyéb információval is szolgál. Az egyéb internetes források közül megemlítendő a National Nanotechnology Initiative (<http://www.nano.gov>), <http://nanotechweb.org>, dr. Ralph Merkle nanotechnológiai oldala (<http://www.zyvex.com/nano>), és a *Nanotechnology*, egy online magazin (<http://www.iop.org/EJ/journal/0957-4484>). A nanotechnológiáról kiterjedt anyag található a szerző honlapján is: <http://www.kurzweilAI.net/>.

[\[405\]](#) Richard P. Feynman, „There’s Plenty of Room at the Bottom” („Odalenn rengeteg hely van”), az American Physical Society éves gyűlése, Pasadena, Kalifornia, 1959; átirat: <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>.

[\[406\]](#) John von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata (Az önreprodukáló automata elmélete)*, A. W. Burks, szerk. (Urbana: University of Illinois Press, 1966).

[\[407\]](#) A kinematikus gépi replikáció legteljesebb áttekintése Robert A. Freitas Jr. és Ralph C. Merkle, *Kinematic Self-Replicating Machines (Kinematikus önreplikáló gépek)*, (Georgetown: Landes Bioscience, 2004) című műve, <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM.htm>.

[\[408\]](#) K. Eric Drexler, *Engines of Creation (A teremtés motorjai)*, és K. Eric Drexler, *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation (Nanorendszerek: Molekuláris gépek, gyártás és számítástechnika)*, (New York: Wiley Interscience, 1992).

[\[409\]](#) Lásd a nanocső-áramkörök tárgyalását a harmadik fejezetben, illetve a fejezet [\[343\]](#) jegyzetében a nanocső-áramkörökben rejlő lehetőségek elemzését.

[\[410\]](#) K. Eric Drexler és Richard E. Smalley, „Nanotechnology: Drexler and Smalley Make the Case for and Against „Molecular Assemblers”” („Nanotechnológia: Drexler és Smalley érvei a »molekuláris összeszerelők« mellett és ellen”), *Chemical and Engineering News*, 2003. november 30., <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>.

[\[411\]](#) Ralph C. Merkle, „A Proposed „Metabolism” for a Hydrocarbon Assembler” („Egy javasolt »metabolizmus« egy szénhidrogén-összeszerelőhöz”), *Nanotechnology* 8 (1997. december): 149–62, <http://www.iop.org/EJ/abstract/0957-4484/8/4/001> vagy <http://www.zyvex.com/nanotech/hydroCarbonMetabolism.html>. Lásd még Ralph C. Merkle, „Binding Sites for Use in a Simple Assembler” („Egy egyszerű összeszerelő kapcsolódási helyei”), *Nanotechnology* 8 (1997): 23–28. o., <http://www.zyvex.com/nanotech/bindingSites.html>; Ralph C. Merkle, „A New Family of Six Degree of Freedom Positional Devices” („A hat szabadsági fokkal rendelkező pozicionáló eszközök új családja”), *Nanotechnology* 8 (1997): 47–52. o., <http://www.zyvex.com/nanotech/6dof.html>; Ralph C. Merkle, „Casing an Assembler” („Egy összeszerelő burkolata”), *Nanotechnology* 10 (1999): 315–22. o., <http://www.zyvex.com/nanotech/casing>; Robert A. Freitas Jr., „A Simple Tool for Positional Diamond Mechanosynthesis, and Its Method of Manufacture” („Egy egyszerű eszköz a pozicionális gyémánt-mechanoszintézishez és gyártási eljárása”), U.S. Provisional Patent Application No. 60/543,802, iktatva 2004. február 11., a folyamat

bemutatásra került egy előadásban: <http://www.MolecularAssembler.com/Papers/PathDiamMolMfg.htm>; Ralph C. Merkle és Robert A. Freitas Jr., „Theoretical Analysis of a Carbon-Carbon Dimer Placement Tool for Diamond Mechanochemistry” („Egy, a gyémánt-mechanoszintézishez való szén-szén elhelyező eszköz elméleti elemzése”), *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 3 (2003. augusztus): 319–24. o., <http://www.rfreitas.com/Nano/JNNDimerTool.pdf>; Robert A. Freitas Jr. és Ralph C. Merkle, „Merkle-Freitas Hydrocarbon Molecular Assembler” („A Merkle–Freitas-féle molekuláris szénhidrogén-összeszerelő”); in *Kinematic Self-Replicating Machines (Kinematikus önreplikáló gépek)*, 4.11.3. szakasz (Georgetown: Landes Bioscience, 2004), 130–35. o., <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/4.11.3.htm>.

[\[412\]](#) Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine (Nanogyógyászat)*, 1. kötet, *Basic Capabilities (Alapvető képességek)*, 6.3.4.5. szakasz, „Chemoelectric Cells” („Kemoelektromos sejtek”), (Georgetown: Landes Bioscience, 1999), 152–54. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.3.4.5.htm>; Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, vol. 1, *Basic Capabilities*, 6.3.4.4. szakasz, „Glucose Engines” („Glükózmotorok”), (Georgetown: Landes Bioscience, 1999), 149–52. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.3.4.4.htm>; K. Eric Drexler, *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation (Nanorendszerek: Molekuláris gépezetek, gyártás és számítástechnika)*, 16.3.2. szakasz, „Acoustic Power and Control” („Akusztikus teljesítmény és szabályozás”), (New York: Wiley Interscience, 1992), 472–76. o. Lásd még Robert A. Freitas Jr. és Ralph C. Merkle, *Kinematic Self-Replicating Machines*, B.4. függelék, „Acoustic Transducer for Power and Control” („Akusztikus transzduktor a teljesítményhez és a szabályozáshoz”), (Georgetown: Landes Bioscience, 2004), 225–33. o., <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/AppB.4.htm>.

[\[413\]](#) Ezeknek a javaslatoknak a legátfogóbb összefoglalása megtalálható in: Robert A. Freitas Jr. és Ralph C. Merkle, *Kinematic Self-Replicating Machines (Kinematikus önreplikáló gépek)*, 4. fejezet, „Microscale and Molecular Kinematic Machine Replicators” („Mikroskálájú és molekuláris kinematikus gépi replikátorok”), (Georgetown: Landes Bioscience, 2004), 89–144. o., <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/4.htm>.

[\[414\]](#) Drexler, *Nanosystems*, 441. o.

[\[415\]](#) Ezeknek a javaslatoknak a legátfogóbb összefoglalása megtalálható in: Robert A. Freitas Jr. és Ralph C. Merkle, *Kinematic Self-Replicating Machines (Kinematikus önreplikáló gépek)*, 4. fejezet, „Microscale and Molecular Kinematic Machine Replicators” („Mikroskálájú és molekuláris kinematikus gépi replikátorok”), (Georgetown: Landes Bioscience, 2004), 89–144. o., <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/4.htm>.

[\[416\]](#) T. R. Kelly, H. De Silva és R. A. Silva, „Unidirectional Rotary Motion in a Molecular System” („Egyirányú forgó mozgás egy molekuláris rendszerben”), *Nature* 401.6749 (1999. szeptember 9.): 150–52. o.

[\[417\]](#) Carlo Montemagno és George Bachand, „Constructing Nanomechanical Devices Powered by Biomolecular Motors” („Biomolekuláris motorok által hajtott nanomechanikus eszközök építése”), *Nanotechnology* 10 (1999): 225–31. o.; George D. Bachand és Carlo D. Montemagno, „Constructing Organic/Inorganic NEMS Devices Powered by Biomolecular Motors” („Biomolekuláris motorokkal hajtott szerves/szervetlen NEMS-eszközök építése”), *Biomedical Microdevices* 2.3 (2000 június): 179–84. o.

[\[418\]](#) N. Koumura et al., „Light-Driven Monodirectional Molecular Rotor” („Fénymeghajtású egyirányú molekuláris rotor”), *Nature* 401.6749 (1999. szeptember 9.): 152–55. o.

[\[419\]](#) Berkeley Lab, „A Conveyor Belt for the Nano-Age”, („A nanokorszak futószalagja”), 2004. április 28., <http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/MSD-conveyor-belt-for-nanoage.html>.

[\[420\]](#) „Study: Self-Replicating Nanomachines Feasible”, („Tanulmány: kivitelezhető az önreplikáló nanogépezet”), 2004. június 2., beszámoló Tihamer Toth-Fejel, „Modeling Kinematic Cellular Automata” („Kinematikus sejtautomaták modellezése”) c. cikkéről, 2004. április 30., http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/883Toth-Fejel.pdf.

[\[421\]](#) W. U. Dittmer, A. Reuter és F. C. Simmel, „A DNA-Based Machine That Can Cyclically Bind and Release Thrombin” („Egy DNS-alapú gépezet, ami képes ciklikusan megkötni és felszabadítani a thrombint”), *Angewandte Chemie International Edition* 43 (2004): 3550–53. o.

[\[422\]](#) Shiping Liao és Nadrian C. Seeman, „Translation of DNA Signals into Polymer Assembly Instructions” („DNS-szignálók átfordítása polimer összeszerelési utasításokká”), *Science* 306 (2004. december 17.): 2072–74. o., <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3470904/>.

[\[423\]](#) Scripps Kutatóintézet, „Nano-origami” („Nano-origami”), 2004. február 11. http://www.eurekalert.org/pub_releases/2004-02/sri-n021004.php.

[\[424\]](#) Jenny Hogan, „DNA Robot Takes Its First Steps” („A DNS-robot első lépései”), 2004. május 6., <http://www.newscientist.com/article/dn4958-dna-robot-takes-its-first-steps.html>, beszámoló Nadrian Seeman és William Sherman, „A Precisely Controlled DNA Biped Walking Device” („Egy precízen vezérelt kétfélbű DNS-járószervezet”), *Nano Letters* 4.7 (2004. július): 1203–7. o., című tanulmányáról.

[\[425\]](#) Helen Pearson, „Construction Bugs Find Tiny Work” („Az építőbogarak kis munkát találnak”), *Nature News*, 2003. július 11.,

[\[426\]](#) Richard E. Smalley, „Nanofallacies: Of Chemistry, Love and Nanobots” („Nanoesendőségek: kémiaíró, szerelemről és nanobotokról”), *Scientific American* 285.3 (2001. szeptember): 76–77. o.

[\[427\]](#) Lásd a hivatkozásokat lentebb, a [\[442\]](#) és [\[443\]](#) jegyzetben. Lásd még Drexler javaslatát a *Nanosystems*-ben. Az igazolásokat illetően lásd Xiao Yan Chang, Martin Perry, James Peploski, Donald L. Thompson és Lionel M. Raff, „Theoretical Studies of Hydrogen-Abstraction Reactions from Diamond and Diamondlike Surfaces” („Elméleti tanulmányok a hidrogénabsztrakciós reakciókról a gyémántból és gyémántszerű felületekről”), *Journal of Chemical Physics* 99 (1993. szeptember 15.): 4748–58. o. Lásd még L. J. Lauhon és W. Ho, „Inducing and Observing the Abstraction of a Single Hydrogen Atom in Bimolecular Reaction with a Scanning Tunneling Microscope” („Egy hidrogénatom kivonásának kiváltása és megfigyelése egy kétmolekulás reakcióban pásztázó alagútmikroszkóppal”), *Journal of Physical Chemistry* 105 (2000): 3987–92. o.; G. Allis és K. Eric Drexler, „Design and Analysis of a Molecular Tool for Carbon Transfer in Mechanosynthesis” („Egy, a mechanoszintézis során a szénátvitelt végző molekuláris eszköz terve és elemzése”), *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 2.1 (2005. március–április, megjelenés előtt).

[\[428\]](#) Lea Winerman, „How to Grab an Atom” („Hogyan fogjunk meg egy atomot?”), *Physical Review Focus*, 2003. május 2., <http://physics.aps.org/story/v11/st19>, beszámoló Noriaki Oyabu, „Mechanical Vertical Manipulation of Selected Single Atoms by Soft Nanoindentation Using a Near Contact Atomic Force Microscope” („Kiválasztott egyedi atomok mechanikus vertikális manipulációja puha nanoindentáció révén közeli atommikroszkópot használva”), *Physical Review Letters* 90.17 (2003. május 2.): 176 102. o.

[\[429\]](#) Robert A. Freitas Jr., „Technical Bibliography for Research on Positional Mechanosynthesis” („Technikai kutatási bibliográfia a pozicionális mechanoszintézishez”), Foresight Intézet weboldal, 2003. december 16., <http://foresight.org/stage2/mechsynthbib.html>.

[\[430\]](#) Lásd az egyenletet és a magyarázatot Ralph C. Merkle, „That’s Impossible! How Good Scientists Reach Bad Conclusions” („Ez lehetetlen! Hogyan jutnak a jó tudósok rossz következtetésekre?”) című cikkének 3. oldalán, <http://www.zyvex.com/nanotech/impossible.html>.

[\[431\]](#) „Így ΔX_c mindössze ~5%-a a tipikus atomi elektronfelhő ~0,3 nm átmérőjének, ami csak kismértékben növeli a konstrukció korlátait, és a nanomechanikai eszközök stabilitását. (Még a forrásponton lévő folyadékok többségében is a molekulák mindössze ~0,07 nm-t mozdulnak el az átlagos helyzetükből.)” Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, vol. 1, *Basic Capabilities*, 2.1. szakasz, „Is Molecular Manufacturing Possible?” („Lehetséges a molekuláris gyártás?”), (Georgetown: Landes Bioscience, 1999), 39. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/2.1.htm#p9>.

[\[432\]](#) Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, vol. 1, *Basic Capabilities*, 6.3.4.5. szakasz, „Chemoelectric Cells” („Kemoelektromos sejtek”), (Georgetown: Landes Bioscience, 1999), 152–54. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.3.4.5.htm>.

[\[433\]](#) Montemagno-Bachand: „Constructing Nanomechanical Devices Powered by Biomolecular Motors” („Biomolekuláris motorok által hajtott nanomechanikus eszközök építése”).

[\[434\]](#) Nyílt levél a Foresight elnökétől, K. Eric Drexlertől a Nobel-díjra jelölt Richard Smalley-nek, <http://www.foresight.org/NanoRev/Letter.html>, illetve <http://www.KurzweilAI.net/>. A teljes történet: Ray Kurzweil, „The Drexler-Smalley Debate on Molecular Assembly” („A Drexler-Smalley-vita a molekuláris összeszerelésről”), <http://www.kurzweilai.net/the-drexler-smalley-debate-on-molecular-assembly>.

[\[435\]](#) K. Eric Drexler és Richard E. Smalley, „Nanotechnology: Drexler and Smalley Make the Case for and Against „Molecular Assemblers”” („Nanotechnológia: Drexler és Smalley érvei a »molekuláris összeszerelők« mellett és ellen”), *Chemical & Engineering News* 81.48 (2003. december 1.): 37–42. o., <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>.

[\[436\]](#) A. Zaks és A. M. Klibanov, „Enzymatic Catalysis in Organic Media at 100 Degrees C” („Enzimkatalízis organikus közegben 100 Celsius-fokon”), *Science* 224.4654 (1984. június 15.): 1249–51. o.

[\[437\]](#) Patrick Bailey, „Unraveling the Big Debate About Small Machines” („A nagy vita a kis gépekről”), *BetterHumans*, 2004. augusztus 16.

[\[438\]](#) Charles B. Musgrave et al., „Theoretical Studies of a Hydrogen Abstraction Tool for Nanotechnology” („Elméleti tanulmányok egy hidrogénabsztrakciós eszközről a nanotechnológiában”), *Nanotechnology* 2 (1991. október): 187–95. o.; Michael Page és Donald W. Brenner, „Hydrogen Abstraction from a Diamond Surface: *Ab initio* Quantum Chemical Study with Constrained Isobutane as a Model” („Hidrogénabsztrakció gyémántfelszínről: *ab initio* kvantumkémiai tanulmány, korlátozott izobutánmodellel”), *Journal of the American Chemical Society* 113.9 (1991): 3270–74. o.; Xiao Yan Chang, Martin Perry, James Peploski, Donald L. Thompson és Lionel M. Raff, „Theoretical Studies of Hydrogen-Abstraction Reactions from Diamond and Diamond-like Surfaces” („Elméleti tanulmányok a hidrogénabsztrakciós reakciókról gyémántból és gyémántszerű felületekről”) *Journal of Chemical Physics* 99 (1993. szeptember 15.): 4748–58. o.; J. W. Lyding, K. Hess, G. C. Abeln, et al., „UHV-STM Nanofabrication and Hydrogen/Deuterium Desorption from Silicon Surfaces: Implications for CMOS Technology” („UHV-STM nanogyártás és hidrogén/deutérium deszorpció szilíciumfelszínről: kihatásai a CMOS-technológiára”), *Applied Surface Science* 132 (1998): 221. o.; <http://www.hersam-group.northwestern.edu/publications.html>; E. T. Foley et al., „Cryogenic UHV-STM Study of Hydrogen and Deuterium Desorption from Silicon(100)” („Kriogén UHV-STM tanulmány a hidrogén és deutérium szilícium(100)-ból való deszorpciójáról”), *Physical Review Letters* 80 (1998): 1336–39. o.

http://prola.aps.org/abstract/PRL/v80/i6/p1336_1; L. J. Lauhon és W. Ho, „Inducing and Observing the Abstraction of a Single Hydrogen Atom in Bimolecular Reaction with a Scanning Tunneling Microscope” („Egy hidrogénatom kiváltása és megfigyelése egy kétmolekulás reakcióban pásztázó alagútmikroszkóppal”), *Journal of Physical Chemistry* 105 (2000): 3987–92. o.

[439] Stephen P. Walch és Ralph C. Merkle, „Theoretical Studies of Diamond Mechanosynthesis Reactions” („Elméleti tanulmányok a gyémánt-mechanoszintézis reakcióiról”), *Nanotechnology* 9 (1998. szeptember): 285–96. o.; Fedor N. Dzegilenko, Deepak Srivastava és Subhash Saini, „Simulations of Carbon Nanotube Tip Assisted Mechano-Chemical Reactions on a Diamond Surface” („A szén nanocsővég által elősegített mechanokémiai reakciók szimulációi gyémántfelszínen”), *Nanotechnology* 9 (1998. december): 325–30. o.; Ralph C. Merkle és Robert A. Freitas Jr., „Theoretical Analysis of a Carbon-Carbon Dimer Placement Tool for Diamond Mechanosynthesis” („Egy, a gyémánt-mechanoszintézishez való szén-szén elhelyező eszköz elméleti elemzése”), *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 3 (2003. augusztus): 319–24. o., <http://www.rfreitas.com/Nano/DimerTool.htm>; Jingping Peng, Robert A. Freitas Jr. és Ralph C. Merkle, „Theoretical Analysis of Diamond Mechano-Synthesis. Part I. Stability of C2 Mediated Growth of Nanocrystalline Diamond C(110) Surface” („A gyémánt-mechanoszintézis elméleti elemzése. I. rész. A nanokristály-gyémánt C(110) felszín C2 mediált növekedése”), *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 1 (március 2004): 62–70. o., <http://www.molecularassembler.com/JCTNPengMar04.pdf>; David J. Mann, Jingping Peng, Robert A. Freitas Jr. és Ralph C. Merkle, „Theoretical Analysis of Diamond MechanoSynthesis. Part II. C2 Mediated Growth of Diamond C(110) Surface via Si/Ge-Triadamantane Dimer Placement Tools” („A gyémánt-mechanoszintézis elméleti elemzése. II. rész. Gyémánt C(110) felszín C2 mediált növekedése Si/Ge-triadamantán elhelyező eszközökkel”), *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 1 (2004. március), 71–80. o., <http://www.molecularassembler.com/JCTNMannMar04.pdf>.

[440] A hidrogénabsztrakciós eszköz és a szénlerakó eszköz elemzésében sokan részt vettek, köztük Donald W. Brenner, Tahir Cagin, Richard J. Colton, K. Eric Drexler, Fedor N. Dzegilenko, Robert A. Freitas Jr., William A. Goddard III, J. A. Harrison, Charles B. Musgrave, Ralph C. Merkle, Michael Page, Jason K. Perry, Subhash Saini, O. A. Shenderova, Susan B. Sinnott, Deepak Srivastava, Stephen P. Walch és Carter T. White.

[441] Ralph C. Merkle, „A Proposed ‚Metabolism’ for a Hydrocarbon Assembler” („Egy javasolt »metabolizmus« egy szénhidrogén-összeszerelőhöz”), *Nanotechnology* 8 (1997. december): 14–62. o., <http://www.iop.org/EJ/abstract/0957-4484/8/4/001> vagy <http://www.zyvex.com/nanotech/hydroCarbonMetabolism.html>.

[442] Egy hasznos bibliográfia a hivatkozásokról: Robert A. Freitas Jr., „Technical Bibliography for Research on Positional Mechanosynthesis” („Technikai kutatási bibliográfia a pozicionális mechanoszintézishez”), Foresight Intézet weboldal, 2003. december 16., <http://foresight.org/stage2/mechsynthbib.html>; Wilson Ho és Hyojune Lee, „Single Bond Formation and Characterization with a Scanning Tunneling Microscope” („Egyszeres kötés kialakulása és jellemzése pásztázó alagútmikroszkóppal”), *Science* 286.5445 (1999. november 26.): 1719–22. o., <http://www.physics.uci.edu/~wilsonho/stm-iets.html>; K. Eric Drexler, *Nanosystems (Nanorendszerek)*, 8. fejezet; Ralph Merkle, „Proposed ‚Metabolism’ for a Hydrocarbon Assembler” („Egy javasolt »metabolizmus« egy szénhidrogén-összeszerelőhöz”); Musgrave et al., „Theoretical Studies of a Hydrogen Abstraction Tool for Nanotechnology” („Elméleti tanulmányok egy hidrogénabsztrakciós eszközről a nanotechnológiában”); Michael Page és Donald W. Brenner, „Hydrogen Abstraction from a Diamond Surface: *ab initio* Quantum Chemical Study with Constrained Isobutane as a Model” („Hidrogénabsztrakció gyémántfelszínről: *ab initio* kvantumkémiai tanulmány, mesterséges izobután modellel”), *Journal of the American Chemical Society* 113.9 (1991): 3270–74. o.; D. W. Brenner et al., „Simulated Engineering of Nanostructures” („Szimulált nanostruktúra-tervezés”), *Nanotechnology* 7 (1996. szeptember): 161–67. o., <http://www.zyvex.com/nanotech/nano4/brennerPaper.pdf>; S. P. Walch, W. A. Goddard III és Ralph Merkle, „Theoretical Studies of Reactions on Diamond Surfaces” („Elméleti tanulmányok a gyémántfelszíneken történő reakciókról”), Fifth Foresight Conference on Molecular Nanotechnology, 1997, <http://www.foresight.org/Conferences/MNT05/Abstracts/Walcabst.html>; Stephen P. Walch és Ralph C. Merkle, „Theoretical Studies of Diamond Mechanosynthesis Reactions” („Elméleti tanulmányok a gyémántmechanoszintézis-reakciókról”), *Nanotechnology* 9 (1998. szeptember): 285–96. o.; Fedor N. Dzegilenko, Deepak Srivastava és Subhash Saini, „Simulations of Carbon Nanotube Tip Assisted Mechano-Chemical Reactions on a Diamond Surface” („A szén nanocsővég által elősegített mechanokémiai reakciók szimulációi gyémántfelszínen”), *Nanotechnology* 9 (1998. december): 325–30. o.; J. W. Lyding et al., „UHV-STM Nanofabrication and Hydrogen/Deuterium Desorption from Silicon Surfaces: Implications for CMOS Technology” („UHV-STM nanogyártás és hidrogén/deutérium deszorpció szilíciumfelszínről: kihatásai a CMOS-technológiára”), *Applied Surface Science* 132 (1998): 221. o., <http://www.hersam-group.northwestern.edu/publications.html>; E. T. Foley et al., „Cryogenic UHV-STM Study of Hydrogen and Deuterium Desorption from Silicon(100)” („Kriogén UHV-STM tanulmány a hidrogén és deutérium szilícium(100)-ból való deszorpciójáról”), *Physical Review Letters* 80 (1998): 1336–39. o., http://prola.aps.org/abstract/PRL/v80/i6/p1336_1; M. C. Hersam, G. Cabeln és J. W. Lyding, „An Approach for Efficiently Locating and Electrically Contacting Nanostructures Fabricated via UHV-STM Lithography on Si(100)” („Egy módszer az UHV-STM litográfiával Si(100)-on létrehozott nanostruktúrák hatékony elhelyezésére és elektromos érintkeztetésére”), *Microelectronic Engineering* 47 (1999): 235–37. o.; L. J. Lauhon és W. Ho, „Inducing and Observing the Abstraction of a Single Hydrogen Atom in Bimolecular Reaction with a Scanning Tunneling Microscope” („Egy hidrogénatom kilépésének kiváltása és megfigyelése egy kétmolekulás reakcióban pásztázó alagútmikroszkóppal”), *Journal of Physical Chemistry* 105 (2000): 3987–92. o., <http://www.physics.uci.edu/~wilsonho/stm-iets.html>.

[443] Eric Drexler, „Drexler Counters” („Drexler válasza”), először megjelent a KurzweilAI.net-en 2003. november 1-jén:

<http://www.kurzweilai.net/drexler-counters>. Lásd még K. Eric Drexler, *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation* (*Nanorendszerek: Molekuláris gépek, gyártás és számítástechnika*), (New York: Wiley Interscience, 1992), 8. fejezet; Ralph C. Merkle, „Foresight Debate with *Scientific American*” („A Foresight vitája a *Scientific American*nel”), (1995), <http://www.foresight.org/SciAmDebate/SciAmResponse.html>; Wilson Ho és Hyojune Lee, „Single Bond Formation and Characterization with a Scanning Tunneling Microscope” („Egyszeres kötés kialakulása és karakterizációja pásztázó alagútmikroszkóppal”), *Science* 286.5445 (1999. november 26.): 1719–22. o., <http://www.physics.uci.edu/~wilsonho/stm-iets.html>; K. Eric Drexler, David Forrest, Robert A. Freitas Jr., J. Storrs Hall, Neil Jacobstein, Tom McKendree, Ralph Merkle és Christine Peterson, „On Physics, Fundamentals, and Nanorobots: A Rebuttal to Smalley’s Assertion that Self-Replicating Mechanical Nanorobots Are Simply Not Possible: A Debate About Assemblers” („Fizikáról, alapokról és nanorobotokról: válasz Smalley felvetésére, miszerint az önreplikáló nanorobotok egyszerűen nem lehetségesek – vita az összeszerelőkről”), (2001), <http://www.imm.org/SciAmDebate2/smalley.html>.

[444] Lásd <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>; <http://www.kurzweilAI.net/>.

[445] D. Maysinger et al., „Block Copolymers Modify the Internalization of Micelle-Incorporated Probes into Neural Cells” („A tömb-kopolimerek módosítják a micellába ágyazott szondák idegsejtekbe való beépülését”), *Biochimica et Biophysica Acta* 1539.3 (2001. június 20): 205–17. o.; R. Savic et al., „Micellar Nanocontainers Distribute to Defined Cytoplasmic Organelles” („A micelláris nanotárolók meghatározott citoplazmikus sejtszervecskékhez jutnak el”), *Science* 300.5619 (2003. április 25.): 615–18. o.

[446] T. Yamada et al., „Nanoparticles for the Delivery of Genes and Drugs to Human Hepatocytes” („Nanorészecskék a gének és gyógyszerek emberi hepatocitákhoz való eljuttatására”), *Nature Biotechnology* 21.8 (2003. augusztus): 885–90. o. Elektronikusan megjelent 2003. június 29-én, Absztrakt: <http://www.nature.com/cgi-taf/DynaPage.taf?file=/nbt/journal/v21/n8/abs/nbt843.html>. A *Nature* rövid sajtóközleménye: http://www.nature.com/nbt/press_release/nbt0803.html.

[447] Richards Grayson et al., „A BioMEMS Review: MEMS Technology for Physiologically Integrated Devices” („BioMEMS-áttekintés: MEMS-technológia a fiziológiailag integrált eszközökben”), *IEEE Proceedings* 92 (2004): 6–21. o.; Richards Grayson et al., „Molecular Release from a Polymeric Microreservoir Device: Influence of Chemistry, Polymer Swelling, and Loading on Device Performance” („Molekuláris elengedés egy polimer mikrotároló eszközből: a kémia, a polimer duzzadás és a terhelés hatása az eszköz teljesítményére”), *Journal of Biomedical Materials Research* 69A.3 (2004. június 1.): 502–12. o.

[448] D. Patrick O’Neal et al., „Photo-thermal Tumor Ablation in Mice Using Near Infrared-Absorbing Nanoparticles” („Fototermális tumorlevágás egerekben infravörshöz közelítő tartományban elnyelő nanorészecskékkel”), *Cancer Letters* 209.2 (2004. június 25.): 171–76. o.

[449] International Energy Agency, R. E. Smalley egyik prezentációjából, „Nanotechnology, the S&T Workforce, Energy & Prosperity” („Nanotechnológia, az S&T munkaerő, energia és jólét”), 12. o., előadva a PCAST-ban (A tudományos és technológiai elnöki tanácsadók tanácsa”), Washington, 2003. március 3.; lásd még <http://cohesion.rice.edu/NaturalSciences/Smalley/emplibary/PCAST%20March%203,%202003.ppt>.

[450] Smalley, „Nanotechnology, the S&T Workforce, Energy & Prosperity” („Nanotechnológia, az S&T munkaerő, energia és jólét”).

[451] „FutureGen – A Sequestration and Hydrogen Research Initiative” („FutureGen – Szekvesztráció és Hidrogén Kutatási Kezdeményezés”), U.S. Energiaügyi Minisztérium, Office of Fossil Energy, 2003. február http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/futuregen/futuregen_factsheet.pdf.

[452] Drexler, *Nanosystems* (*Nanorendszerek*), 428. és 433. o.

[453] Barnaby J. Feder, „Scientist at Work/Richard Smalley: Small Thoughts for a Global Grid” („Tudósok munka közben: Richard Smalley – Kis gondolatok egy globális hálózatról”), *New York Times*, 2003. szeptember 2.; a linkhez előfizetés szükséges: <http://www.nytimes.com/2003/09/02/science/scientist-at-work-richard-smalley-small-thoughts-for-a-global-grid.html>.

[454] A Nemzetközi Energiaügynökség idézi Smalley, „Nanotechnology, the S&T Workforce, Energy & Prosperity” („Nanotechnológia, az S&T munkaerő, energia és jólét”), 12. o.

[455] American Council for the United Nations University, Millennium Project Global Challenge 13: millennium-project.org/millennium/unspec.pdf.

[456] „Wireless Transmission in Earth’s Energy Future” („A vezeték nélküli továbbítás a Föld energiájának jövőjében”), Environment News Service, 2002. november 19., Jerome C. Glenn és Theodore J. Gordon felszólalásáról, „2002 State of the Future” („A jövő 2002-ből”), American Council for the United Nations University (2002. augusztus).

[457] A szerző befektető és tanácsadó a vállalatnál.

[458] „NEC Unveils Methanol-Fueled Laptop” („A NEC metanollal hajtott laptopot mutatott be”), Associated Press, 2003. június 30., a NEC sajtóközleménye kapcsán, „NEC Unveils Notebook PC with Built-In Fuel Cell” („A NEC beépített energiasejtű notebookot mutatott be”), 2003. június 30., <http://www.nec.co.jp/press/en/0306/3002.html>.

[459] Tony Smith, „Toshiba Boffins Prep Laptop Fuel Cell” („A Toshiba kutatói laptop-energiacellát fejlesztenek”), *The Register*, 2003. március 5., http://www.theregister.co.uk/2003/03/05/toshiba_boffins_prep_laptop_fuel/; Yoshiko Hara, „Toshiba Develops Matchbox-Sized Fuel Cell for Mobile Phones”, *EE Times*, 2004. június 24., <http://www.eetimes.com/electronics-news/4049340/Toshiba-develops-matchbox-sized-fuel-cell-for-mobile-phones>, reporting on Toshiba press release, „Toshiba Announces World’s Smallest Direct Methanol Fuel Cell with Energy Output of 100 Milliwatts” („A Toshiba bejelentette a világ legkisebb közvetlen metanol energiacelláját, 100 milliwatt kimenő teljesítménnyel”).

[460] Karen Lurie, „Hydrogen Cars” („Hidrogénhajtású autók”), *ScienceCentral News*, 2004. május 13.

[461] Louise Knapp, „Booze to Fuel Gadget Batteries” („Piát az üzemanyagcellákba”), *Wired News*, 2003. április 2., <http://www.wired.com/gadgets/miscellaneous/news/2003/04/58119>, és a St. Louis-i Egyetem sajtóközleménye, „Powered by Your Liquor Cabinet, New Biofuel Cell Could Replace Rechargeable Batteries” („A bárszekrényből tölthető új bioüzemanyag-cella felválthatja a tölthető akkumulátorokat”), 2003. március 24., <http://www.slu.edu/readstory/newsinfo/2474>, beszámolva Nick Akers és Shelley Minter, „Towards the Development of a Membrane Electrode Assembly” („A sejthártya-elektroda összeszerelésének kifejlesztése felé”) előadásáról, ami az American Chemical Society országos találkozóján, Anaheimben hangzott el. (2003).

[462] „Biofuel Cell Runs on Metabolic Energy to Power Medical Implants”, *Nature Online*, 2002. november 12., <http://www.nature.com/news/2002/021111/full/021111-1.html>, reporting on N. Mano, F. Mao, and A. Heller, „A Miniature Biofuel Cell Operating in a Physiological Buffer”, *Journal of the American Chemical Society* 124 (2002): 12 962–63.

[463] „Power from Blood Could Lead to „Human Batteries”” („A vérsejtekből nyert energia »emberi akkumulátorokhoz« vezethet”), *FairfaxDigital*, 2003. augusztus 4. A mikrobiális energiacellákról lásd még: <http://www.geobacter.org/>. Matsuhiko Nishizawa BioMEMS laboratóriuma felvázol egy mikro-bioenergiacellát: http://www.biomems.mech.tohoku.ac.jp/research_e.html. Ez a rövid cikk egy beültethető, nem toxikus energiaforrás fejlesztéséről szól, ami 0,2 watt előállítására képes: <http://www.iol.co.za/scitech/technology/new-fuel-cell-opens-way-for-artificial-hearts-1.241066>.

[464] Mike Martin, „Pace-Setting Nanotubes May Power Micro-Devices” („Az ütemszabályozó nanocsövek mikroeszközöket hajtják”), *NewsFactor*, 2003. február 27., <http://www.physics.iisc.ernet.in/~asood/Pace-Setting%20Nanotubes%20May%20Power%20Micro-Devices.htm>.

[465] „Végezetül, lehetséges határt szabni a bolygószinten aktív nanorobot-tömegnek a globális energiaegyensúly figyelembevételével. A Föld felszínét érő összes napsugárzás $\sim 1,75 \times 10^{17}$ watt ($I_{\text{Föld}} \sim 1370 \text{ W/m}^2 \pm 0,4\%$ normális esetben).” Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, vol. 1, *Basic Capabilities*, 6.5.7. szakasz, „Global Hypsithermal Limit” („Globális hipszitermális határ”), (Georgetown: Landes Bioscience, 1999), 175–76. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.5.7.htm#p1>.

[466] z 10 milliárd (10^{10}) személyt feltételez, a nanorobotok körülbelül 10^{-7} watt per köbméteres energiasűrűségét, egy köbmikronos nanorobotméretet, és nanobotonként körülbelül 10 pikowatt (10^{-11} watt) energiafelvételt. A 10^{-16} watt hipszitermális határ személyenként körülbelül 10 kg nanorobotot jelent, vagy 10^{16} nanorobotot személyenként. Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, vol. 1, *Basic Capabilities*, 6.5.7. szakasz, „Global Hypsithermal Limit” („Globális hipszitermális határ”), (Georgetown: Landes Bioscience, 1999), 175–76. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.5.7.htm#p4>.

[467] A nanotechnológiát úgy is lehet tervezni, hogy alapvetően rendkívül energiahatékony legyen, és így feleslegessé váljon az energia újrahasznosítása, ami kivihetetlen is lenne, mivel viszonylag alacsony újrahasznosítható hőveszteség lenne. Robert A. Freitas, Jr. egy magánlevelében (2005. január) így ír: „Drexler (Nanosystems [„Nanorendszerek”]) azt állítja, hogy az energiaveszteség elméletben akár $\sim 0,1 \text{ MJ/kg}$ is lehet, ha felteszük egy sor olyan mechanokémiai folyamat kifejlesztését, amelyek képesek a nyersanyag-molekulákat összetett termékstruktúrákká alakítani, kizárólag megbízható, szinte visszafordítható lépések révén: $0,1 \text{ MJ/kg}$ gyémántban nagyjából a minimális hőzajnak felel meg szobahőmérsékleten (azaz $kT \sim 4 \text{ zJ/atom}$ 298 Kelvin-fokon.”

[468] Alexis De Vos, *Endoreversible Thermodynamics of Solar Energy Conversion (A napenergia-átalakítás endoreverzibilis termodinamikája)*, (London: Oxford University Press, 1992), 103. o.

[469] R. D. Schaller és V. I. Klimov, „High Efficiency Carrier Multiplication in PbSe Nanocrystals: Implications for Solar Energy Conversion” („Nagy hatékonyságú vivőmultiplikálás PbSe nanokristályokban: kihatásai a napenergia-átalakításra”), *Physical Review Letters* 92.18 (2004. május 7.): 186601.

[470] National Academies Press, Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications, *Harnessing Light: Optical Science and Engineering for the 21st Century (A fény igába fogása: optikatudomány és -tervezés a XXI. században)*, (Washington, D.C.: National Academy Press, 1998), 166. o., <http://books.nap.edu/books/0309059917/html/166.html>.

[471] Matt Marshall, „World Events Spark Interest in Solar Cell Energy Start-ups” („A világ eseményei felkeltették az érdeklődést a napenergia-vállalkozások iránt”), *Mercury News*, 2004. augusztus 15., <http://www.siliconenergy.org/press/solarStartups/>.

[472] John Gartner, „NASA Spaces on Energy Solution”, *Wired News*, 2004. június 22., <http://www.wired.com/news/technology/0,1282,63913,00.html>. Lásd még Arthur Smith, „The Case for Solar Power from Space” („Az űrből származó napenergia melletti érvek”), <http://www.nss.org/adastra/volume16/smith.html>.

[\[473\]](#) *The Space Elevator Primer*, Spaceward Foundation.

[\[474\]](#) enneth Chang, „Experts Say New Desktop Fusion Claims Seem More Credible” („A szakértők szerint az új hidegfúziós állítások hihetőbbnek tűnnek”), *New York Times*, 2004. március 3., <http://www.nytimes.com/2004/03/03/science/03FUSI.html>, beszámoló R. P. Taleyarkhan, „Additional Evidence of Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation” („Újabb bizonyítékok az akusztikus kavitáció során fellépő nukleáris emisszióra”), *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 69.3, 2. rész (2004. március): 036109.

[\[475\]](#) Az asztali hidegfúzió eredeti, palládiumelektrodákat alkalmazó Pons- és Fleischman-módszere nem halott. Lelkes hívei tovább kutatták a technológiát, és az Energiaügyi Minisztérium 2004-ben bejelentette, hogy újra hivatalosan felülvizsgálja az ezen a területen folyó kutatásokat. Toni Feder, „DOE Warms to Cold Fusion” („A DOE megengyhült a hidegfúzió iránt”), *Physics Today* (2004. április). http://www.physicstoday.org/resource/1/phtoad/v57/i4/p27_s1?bypassSSO=1.

[\[476\]](#) Akira Fujishima, Tata N. Rao és Donald A. Tryk, „Titanium Dioxide Photocatalysis” („Titánium-dioxid-fotokatalízis”), *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Review* 1 (2000. június 29.): 1–21. o.; Prashant V. Kamat, Rebecca Huehn és Roxana Nicolaescu, „A „Sense and Shoot” Approach for Photocatalytic Degradation of Organic Contaminants in Water” („A szerves vízszennyezés fotokatalitikus lebontásának »érzékelő és lő» módszere”), *Journal of Physical Chemistry B* 106 (2002. január 31.): 788–94. o.

[\[477\]](#) A. G. Panov et al., „Photooxidation of Toluene and p-Xylene in Cation-Exchanged Zeolites X, Y, ZSM-5, and Beta: The Role of Zeolite Physicochemical Properties in Product Yield and Selectivity” („Toluén és p-xilén fotooxidációja kationcserélt zeolitokban: X, Y, ZSM-5, és Béta. A zeolit fizikokémiai tulajdonságainak hatása a termékhozamra és szelektivitásra.”), *Journal of Physical Chemistry B* 104 (2000. június 22.): 5706–14. o.

[\[478\]](#) Gabor A. Somorjai és Keith McCrea, „Roadmap for Catalysis Science in the 21st Century: A Personal View of Building the Future on Past and Present Accomplishments” („A katalízistudomány XXI. századi pályája: személyes vélemény a jövő felépítéséről a múlt- és jelenbeli eredmények alapján”), *Applied Catalysis A: General* 222.1–2 (2001): 3–18. o., Lawrence Berkeley National Laboratory number 3.LBNL-48555, <http://www.cheric.org/>. Lásd még Zhao, Lu és Millar, „Advances in mesoporous molecular sieve MCM-41” („Előrelépések az MCM-41 mezoporózus molekuláris szűrő területén”), *Industrial & Engineering Chemistry Research* 35 (1996): 2075–90. o.

[\[479\]](#) NTSC/NSET-jelentés, *National Nanotechnology Initiative: The Initiative and Its Implementation Plan* (Nemzeti nanotechnológiai kezdeményezés: A kezdeményezés és a megvalósítási terve), 2000. július, <http://nano.gov/node/243>.

[\[480\]](#) Wei-xian Zhang, Chuan-Bao Wang és Hsing-Lung Lien, „Treatment of Chlorinated Organic Contaminants with Nanoscale Bimetallic Particles” („Klórozott szerves szennyező anyagok kezelése nanoméretű bimetál részecskékkel”), *Catalysis Today* 40 (1988. május 14.): 387–95. o.

[\[481\]](#) R. Q. Long és R. T. Yang, „Carbon Nanotubes as Superior Sorbent for Dioxin Removal” („A szén nanocsövek mint jobb abszorbensek a dioxin-eltávolításban”), *Journal of the American Chemical Society* 123.9 (2001): 2058–59. o.

[\[482\]](#) Robert A. Freitas, Jr. „Death Is an Outrage!” („A halál botrányos!”), előadás az V. AlcorConference on Extreme Life Extension konferencián, Newport Beach, 2002. november 16., <http://www.rfreitas.com/Nano/DeathIsAnOutrage.htm>.

[\[483\]](#) Például az ötödik éves BioMEMS-konferencia, 2003. június, San Jose, <http://www.knowledgepress.com/events/11201717.htm>.

[\[484\]](#) A tervezett négykötetes sorozat első két kötete: Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine* (Nanogyógyászat, I. kötet, *Basic Capabilities* (Alapképességek), (Georgetown: Landes Bioscience, 1999); *Nanomedicine*, IIA. kötet, *Biocompatibility* (Biokompatibilitás), (Georgetown: Landes Bioscience, 2003.); <http://www.nanomedicine.com>.

[\[485\]](#) Robert A. Freitas Jr., „Exploratory Design in Medical Nanotechnology: A Mechanical Artificial Red Cell” („Kísérleti tervezés az orvosi nanotechnológiában: a mechanikus mesterséges vörösvértest”), *Artificial Cells, Blood Substitutes, and Immobilization Biotechnology* 26 (1998): 411–30. o., <http://www.foresight.org.Nanomedicine/Respirocytes.html>.

[\[486\]](#) Robert A. Freitas Jr., „Microbivores: Artificial Mechanical Phagocytes using Digest and Discharge Protocol” („Mikrobivorok: megemésztő- és kiürítő-protokollt alkalmazó mesterséges mechanikus fagociták”), *Zyvex* előzetes megjelenés, 2001. március, <http://www.rfreitas.com/Nano/Microbivores.htm>; Robert A. Freitas Jr., „Microbivores: Artificial Mechanical Phagocytes” („Mikrobivorok: mesterséges mechanikus fagociták”), *Foresight Update* no. 44, 2001. március 31., 11–13. o., <http://www.imm.org/Reports/Rep025.html>; lásd még a mikrobivorokat ábrázoló képeket a Nanomedicine Art Gallery-ben, <http://www.foresight.org/Nanomedicine/Gallery/Species/Microbivores.html>.

[\[487\]](#) Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine*, vol. I, *Basic Capabilities*, 9.4.2.5. szakasz, „Nanomechanisms for Natation” („Nanomechanizmusok úszáshoz”), (Georgetown: Landes Bioscience, 1999), 309–12. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/9.4.2.5.htm>.

[\[488\]](#) George Whitesides, „Nanoinspiration: The Once and Future Nanomachine” („Nanoinspiráció: a volt és leendő

nanogépezet”), *Scientific American* 285.3 (2001. szeptember 16.): 78–83. o.

[489] „Einstein Brown-mozgás közelítése szerint egy másodperc eltelte után szobahőmérsékleten a folyékony víz molekulái átlagosan ~50 mikron távolságra diffundálnak (~400 000 molekulaátmérő), míg egy 1 mikron nagyságú nanorobot ugyanabba a folyadékba merítve ugyanannyi idő alatt mindössze ~0,7 mikronra távolodna el (0,7 átmérőnyire). Ennek értelmében a Brown-mozgás legfeljebb kisebb navigációs hibaforrás az orvosi nanorobotok mozgása szempontjából.” Lásd K. Eric Drexler et al., „Many Future Nanomachines: A Rebuttal to Whitesides’ Assertion That Mechanical Molecular Assemblers Are Not Workable and Not a Concern” („Sok jövőbeli nanogépezet: válasz Whiteside kijelentésére, miszerint a mechanikus molekuláris összeszerelők nem működhetnek és nem adnak okot aggodalomra”), *Debate about Assemblers* („Vita az összeszerelőről”), Institute for Molecular Manufacturing, 2001, <http://www.imm.org/SciAmDebate2/whitesides.html>.

[490] Tejal A. Desai, „MEMS-Based Technologies for Cellular Encapsulation” („MEMS-alapú technológiák a sejtbetokozódáshoz”), *American Journal of Drug Delivery* 1.1 (2003): 3–11. o., az abstract megtekinthető: <http://www.ingentaconnect.com/search/expand?pub=infobike://adis/add/2003/00000001/00000001/art00001>.

[491] Ahogy Douglas Hofstadter idézi in: *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (*Gödel, Escher, Bach: Egybefont gondolatok birodalma*), (New York: Basic Books, 1979) c. könyvében.

[492] A szerző egy céget irányít, a FATKAT-ot (Financial Accelerating Transactions by Kurzweil Adaptive Technologies), ami számítógépes mintázatfelismerést végez pénzügyi adatokon, és ez alapján hoz tőzsdei befektetési döntéseket. <http://www.FatKat.com>.

[493] Lásd a második fejezetben a számítógép-memóriák és általában véve az elektronika ár–teljesítmény-arányának javulását.

[494] Az elszabadult MI az a forgatókönyv, amikor, ahogy Max More leírja, „a szuperintelligens gépek, amelyeket eredetileg az ember javára fogtak munkára, hamarosan lehagynak minket.” Max More, „Embrace, Don’t Relinquish, the Future” („Ne tiltsuk a jövőt, hanem öleljük magunkhoz”), <http://www.kurzweilai.net/embrace-dont-relinquish-the-future>. Lásd még Damien Broderick leírását a „mag MI”-ről: „Az önfejlesztő »mag MI« hihetetlenül lassan futna egy korlátozott gépi szubsztráton. A lényeg viszont, hogy képes fejleszteni magát, és egy ponton olyan hirtelen fejlődést ér el, hogy elsöpörve az architektúrais akadályokat megtervezi saját továbbfejlesztett hardverét, sőt talán meg is építi azt (ha megengedjük neki, hogy hozzáférjen egy gyár gépeihez).” Damien Broderick, „Tearing Toward the Spike” („Száguldás a csúcs felé”), előadás az „Australia at the Crossroads? Scenarios and Strategies for the Future” („Ausztrália válaszüton? Forgatókönyvek és stratégiák a jövőre nézve”), (2000. április 31–május 2.).

[495] David Talbot, „Lord of the Robots” („A robotok ura”), *Technology Review* (2002. április).

[496] Heather Havenstein azt írja, hogy „a science-fiction-írók által kiagyalt, azóta elértéktelenedett fogalmak az emberek és a gépek összeolvadásáról az 1980-as években besározták az MI képét, mivel az MI-t úgy fogták fel, mint ami képtelen megfelelni a benne rejlő lehetőségeknek.” Heather Havenstein, „Spring Comes to AI Winter: A Thousand Applications Bloom in Medicine, Customer Service, Education and Manufacturing” („Tavaszi az MI-k telében: ezernyi alkalmazási terület borul virágba az orvoslástól az ügyfélszolgálatokon és az oktatáson át a gyártásig”), *Computerworld*, 2005. február 14. Ez a besároztott kép vezetett el az „MI-télhez”, ami „Richard Gabriel kifejezése a LISP mesterséges intelligencia nyelv és maga a mesterséges intelligencia iránti, a nyolcvanas években tetőző lelkesedéshullám 1990–94 körüli összeomlására.” Duane Rettig így ír erről: „...a ’80-as évek elején a cégek meglovagolták a nagy MI-hullámot, és a nagyvállalatok dollármilliárdokat öntöttek az MI-felhajtásba, ami évtizedeken belül gondolkodó gépeket ígért. Amikor viszont az ígéretek teljesítése nehezebbnek bizonyult, mint kezdetben hitték, az MI-hullám összeomlott, és vele együtt a LISP-nyelv, mivel szorosan összekapcsolták a mesterséges intelligenciával. Ezt nevezzük MI-télnek.” Duane Rettig idézve in: „AI Winter” („MI-tél”), <http://c2.com/cgi/wiki?AiWinter>.

[497] Az 1957-ben írt General Problem Solver (általános problémamegoldó, GPS) számítógépes program, olyan szabályok révén volt képes feladatokat megoldani, amelyek lehetővé tették, hogy a feladatban kitűzött célt alcélokra bontsa, majd ellenőrizze, hogy egy adott alcél elérése közelebb viszi-e a fő cél megoldásához. Az 1960-as évek elején Thomas Evan megírta az ANALOGY-t, egy „programot, [ami] az IQ-tesztekből és az egyetemi felvételi feladatsorokból vett A:B::C:? formában felvetett geometriai-analógiai problémákat oldott meg.” Boicho Kokinov és Robert M. French, „Computational Models of Analogy-Making” („Az analógiák felállításának számítástechnikai modelljei”), in L. Nadel, szerk., *Encyclopedia of Cognitive Science (A kognitív tudomány enciklopédiája)*, 1. kötet (London: Nature Publishing Group, 2003), 113–18. o. Lásd még A. Newell, J. C. Shaw és H. A. Simon, „Report on a General Problem-Solving Program” („Egy általános problémamegoldó program bemutatása”), *Proceedings of the International Conference on Information Processing* (Paris: UNESCO House, 1959), 256–64. o.; Thomas Evans, „A Heuristic Program to Solve Geometric-Analogy Problems” („Heurisztikus program geometriai analóg problémák megoldásához”), in M. Minsky, szerk., *Semantic Information Processing (Szemantikus információfeldolgozás)*, (Cambridge: MIT Press, 1968).

[498] Sir Arthur Conan Doyle, „The Red-Headed League” („Vörösök szövetsége”), 1890, <http://www.eastoftheweb.com/short-stories/UBooks/RedHead.shtml>.

[\[499\]](#) V. Yu et al., „Antimicrobial Selection by a Computer: A Blinded Evaluation by Infectious Diseases Experts” („Mikrobaellenes kiválasztás számítógéppel: vak értékelés fertőzőbetegség-szakértők által”), *JAMA* 242.12 (1979): 1279–82. o.

[\[500\]](#) Gary H. Anthes, „Computerizing Common Sense” („A józan ész számítógépesítése”), *Computerworld*, 2002. április 8., <http://www.computerworld.com/news/2002/story/0,11280,69881,00.html>.

[\[501\]](#) Kristen Philipkoski, „Now Here’s a Really Big Idea” („Na ez a nagy ötlet”), *Wired News*, 2002. november 25., <http://www.wired.com/news/technology/0,1282,56374,00.html>, beszámoló Darryl Macer, „The Next Challenge Is to Map the Human Mind” („A következő feladat az emberi elme feltérképezése”), *Nature* 420 (2002. november 14.): 121.o.

[\[502\]](#) Thomas Bayes, „An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances” („Esszé az esélyek doktrínáján belüli problémamegoldásról”), megjelent 1763-ban, két évvel a szerző 1761-ben bekövetkezett halála után.

[\[503\]](#) SpamBayes spamszűrő, <http://spambayes.sourceforge.net>.

[\[504\]](#) Lawrence R. Rabiner, „A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition” („Oktatóanyag a rejtett Markov-modellekről és bizonyos beszédfelismerő alkalmazásokról”), *Proceedings of the IEEE* 77 (1989): 257–86. o. A Markov-modellek matematikáját illetően lásd <http://jedlik.phy.bme.hu/~gerjanos/HMM/node2.html>.

[\[505\]](#) A Kurzweil Applied Intelligence (KAI) vállalatot a szerző alapította 1982-ben. 1997-ben százmillió dollárért eladta, és jelenleg a ScanSoft része (korábban Kurzweil Computer Products, a szerző első cége, amit 1980-ban a Xeroxnak adott el) és jelenleg nyílt részvénytársaság. A KAI adta ki az első kereskedelmi nagyszótáras beszédfelismerő rendszert 1987-ben (a Kurzweil Voice Reportot, tízezer szavas szótárral).

[\[506\]](#) A következőkben bemutatom egy neurális hálózat algoritmusának alapvető felépítését. Sok változata lehetséges, és a rendszertervezőknek meg kell adniuk bizonyos kritikus paramétereket és eljárásokat. Részletesebben lásd lentebb.

Egy probléma neurális hálózattal való megoldása a következő lépésekből áll:

- Határozzuk meg az inputot!
- Határozzuk meg a neurális hálózat topológiáját (azaz a neuronok rétegeit és a neuronok közötti kapcsolatokat)!
- Tanítsuk a neurális hálózatot a probléma különböző példáival.
- Futtassuk a betanított neurális hálózatot a probléma új példáinak megoldására!
- Vigyük tőzsdére a neurálishálózat-vállalatunkat!

A következő lépéseket (az utolsó kivételével) lentebb részletezem:

A probléma-input

A probléma inputja a neurális hálózat felé egy sor számból áll. Az input lehet:

- Egy vizuális mintázatot felismerő rendszerben egy számokat tartalmazó kétdimenziós tömb, ami egy kép pixeleit reprezentálja; vagy
- Egy hang(azaz beszéd-)felismerő rendszerben egy számokat tartalmazó kétdimenziós tömb, ami a hangokat reprezentálja, s melyben az egyik dimenzió az adott pillanatban szóló hang paramétereit képviseli (azaz a frekvencia-összetevőket), a másik dimenzió pedig az egymást követő időpontokat; vagy
- Tetszőleges mintázatfelismerő rendszerben számokból álló, n-dimenziós tömb, ami az input mintázatát reprezentálja.

A topológia meghatározása

Egy neurális hálózat létrehozásához az egyes neuronok architektúrája a következőket tartalmazza:

- Több inputot, melyekben minden input „össze van kapcsolva” vagy egy másik neuron outputjával, vagy az egyik input- számmal.
- Általában egyetlen outputot, ami vagy egy másik (általában magasabb rétegben lévő) neuron inputjával, vagy a végső outputtal van összekapcsolva.

Az első neuronréteg kialakítása

• Az első rétegben hozzunk létre N_0 neuront. Minden egyes neuron esetében „kapcsoljuk össze” a neuron több inputját a probléma inputjának „pontjaival” (azaz számaival). Ezek a kapcsolatok lehetnek véletlenszerűek, vagy meghatározhatjuk őket egy evolúciós algoritmussal (lásd lentebb).

• Az így létrejövő kapcsolatok mindegyikéhez rendeljünk hozzá egy „szinaptikus erősséget”. Ezek a súlyozások kezdetben lehetnek egyformák, lehetnek véletlenszerűek, vagy meghatározhatjuk őket más módszerekkel (lásd lentebb).

A további neuronrétegek kialakítása

Alakítsunk ki összesen M neuronréteget. Minden rétegben alakítsuk ki a réteg neuronjait.

i-edik réteg esetében:

• Hozzunk létre N_i neuront a rétegben. Minden egyes neuron több inputját „kapcsoljuk össze” az $n-1$ réteg neuronjainak outputjaival (a variációkat lásd lentebb).

• A létrehozott kapcsolatok mindegyikéhez rendeljünk hozzá egy kezdő „szinaptikus erősséget”. Ezek a súlyozások kezdetben lehetnek egyformák, lehetnek véletlenszerűek, vagy meghatározhatjuk őket más módszerekkel (lásd lentebb).

• Az M-edik réteg neuronjainak outputjai a neurális hálózat outputjai (a variációkat lásd lentebb).

A felismerési próbák

Az egyes neuronok működése

A neuron a létrehozása után a következőket teszi minden egyes felismerési próba során:

- A neuron a hozzá kapcsolódó másik neuron outputjának (vagy az eredeti inputnak) és a kapcsolat szinaptikus erősségének az összeszorozásával kiszámítja a neuron minden egyes súlyozott inputját.
- A neuron összes súlyozott inputja összeadódik.
- Ha ez az összeg nagyobb, mint a neuron kisülési küszöbértéke, akkor a neuron kisülnek minősül, és az outputja 1. Egyébként az outputja 0 (a variációkat lásd lentebb).

Minden egyes felismerési próbánál tegyük a következőt:

Minden rétegben, az elsőtől az M-edikig:

A réteg minden neuronján:

- Adjuk össze súlyozott inputjait (minden súlyozott input = a másik neuron [vagy az eredeti input] outputja megszorozva a szinaptikus kapcsolat erősségével).
- Ha ez az összeg nagyobb, mint a neuron kisülési küszöbértéke, akkor a neuron outputját állítsuk 1-re, egyébként 0-ra.

A neurális hálózat tanítása

- Mintaproblémákon futtassunk többször felismerési próbákat.
- Minden próba után módosítsuk a neuronok közötti kapcsolatok szinaptikus erősségét úgy, hogy a neurális hálózat teljesítménye javuljon a próbán (ennek a hogyanját lásd lentebb).
- Addig folytassuk a tanítást, míg a neurális hálózat pontossága nem javul tovább (azaz eléri az aszimptótáját).

Kulcsfontosságú tervezési szempontok

A fenti egyszerű sémában a neurális hálózat algoritmus-tervezőjének kiinduláskor meg kell határoznia a következőket:

- Mit reprezentálnak az input számai.
- A neuronrétegek számát.
- Az egyes rétegekben lévő neuronok számát. (Nem kell minden rétegben ugyanannyi neuronnak lenni.)
- Az egyes rétegek egyes neuronjai inputjainak a számát. Az inputok száma (azaz a neuronok közötti kapcsolatok) szintén más, és más lehet a különböző rétegekben és a különböző neuronokban.
- A tulajdonképpeni „kapcsolást” (azaz a kapcsolatokat). Minden réteg minden egyes neuronja tartalmaz egy listát a többi neuronról, amiknek az outputjai alkotják a szóban forgó neuron inputjait. Ez a tervrajz lényege, és több lehetséges módszer van a kialakítására:

- (1) Összekapcsolhatjuk a neurális hálózatot véletlenszerűen; vagy
- (2) használhatunk evolúciós algoritmust (lásd lentebb) az optimális kapcsolat meghatározására; vagy
- (3) a rendszer tervezőjének legjobb belátására bízunk a kapcsolat meghatározását.

- Az egyes kapcsolatok kezdeti szinaptikus erőssége (azaz súlyozása). Több lehetséges módszer van ennek a kialakítására:

- (1) Állíthatjuk egyformára a szinaptikus erősségeket; vagy
- (2) állíthatjuk különböző véletlenszerű értékekre a szinaptikus erősségeket; vagy
- (3) használhatunk evolúciós algoritmust a kezdeti értékek optimális elrendezésére; vagy
- (4) a rendszer tervezőjének legjobb belátására bízunk a kezdeti értékek meghatározását.

- Az egyes neuronok kisülési küszöbértéke.

- Az output. Az output lehet:

- (1) az M-edik neuronréteg outputja; vagy
- (2) egy meghatározott output neuron outputja, melynek az inputjai az M-edik réteg neuronjainak az outputjai; vagy
- (3) az M-edik réteg neuronjai outputjainak egy függvénye (azaz összege); vagy
- (4) több réteg neuronjai outputjának valamilyen függvénye.

- Hogyan módosulnak a kapcsolatok szinaptikus erősségei a neurális hálózat betanítása során. Ez kulcsfontosságú tervezési döntés, és nagyon sok kutatás foglalkozik vele. Számos lehetséges módszer van a meghatározására:

- (1) Minden egyes felismerési próbánál egy előre meghatározott (általában kicsi) értékkel növelünk vagy csökkentünk minden egyes szinaptikus erősséget, hogy a neurális hálózat outputja közelítsen a helyes válaszhoz. Lehetséges módszer az, hogy a csökkentéssel és a növeléssel is megpróbálkozunk, majd megnézzük, melyik hozza el a kívánatos hatást. Ez sok időt vehet igénybe, ezért más módszerek is léteznek a helyi döntések meghozására, hogy növelni vagy csökkenteni kell-e az egyes szinaptikus erősségeket.

- (2) Léteznek egyéb statisztikai módszerek a szinaptikus erősségek módosítására az egyes felismerési próbák után, hogy a neurális hálózat teljesítménye az adott próba során jobban közelítsen a helyes válaszhoz.

Érdemes megjegyezni, hogy a neurális hálózat tanítása akkor is működik, ha a próbákra adott válaszok nem mind helyesek. Így használhatunk valós világbeli adatokat, amikben eredendően lehetnek hibák. A neurális hálózat-alapú felismerési rendszerek sikerének egyik kulcsa a betanításra használt adatmennyiség. Általában nagy mennyiségre van szükség a kielégítő eredmények eléréséhez.

Alkárcsak az ember diákok esetében, a neurális hálózat általa tanulásra fordított idő kulcsfontosságú tényező a teljesítmény szempontjából.

Variációk

A fentiek számos variációja kivitelezhető:

- Több különböző módszer van a topológia meghatározására. Különösen a neuronok közötti kapcsolatok meghatározása történhet véletlenszerűen vagy evolúciós algoritmus használatával.
- Több különböző módszer van a kezdeti szinaptikus erősségek meghatározására.
- Az i -edik réteg neuronjai inputjainak nem feltétlenül kell az $i-1$ -edik réteg neuronjai outputjaitól származnia. Az egyes rétegek neuronjai inputjai érkezhetnek bármelyik alacsonyabb vagy magasabb rétegből.
- Több különböző módszer van a végső output meghatározására.
- A fent leírt módszer „minden vagy semmi” (1 vagy 0) kisülést eredményez, amit nonlinearitásnak neveznek. Vannak egyéb nonlinearis függvények is. Általában olyat alkalmaznak, ami gyorsan, de fokozatosan vesz fel értékeket 0 és 1 között. Emellett az outputok is lehetnek más értékek, nem csak 1 vagy 0.
- A betanítás során a szinaptikus erősségek módosítására alkalmazott módszerek kulcsfontosságú tervezési döntések.

A fenti séma „szinkron” neurális hálózatot ír le, amelyben minden egyes felismerési próbát az egyes rétegek outputjának kiszámítása követi, az első rétegtől az M -edikig. Egy valóban párhuzamos rendszerben, melyben minden egyes neuron a többitől függetlenül működik, a neuronok „aszinkron” módon (azaz önállóan) működnek. Az aszinkron megközelítésben mindegyik neuron folyamatosan figyeli az inputjait és kisül, amint a súlyozott inputjainak az összege meghaladja a küszöbértéket (vagy amit az output függvénye meghatároz).

[\[507\]](#) Az agy visszafejtését illetően lásd a 4. fejezetet. Az előrehaladás egyik példjaként S. J. Thorpe így ír: „Igazából éppen csak belekezdünk egy hosszúnak ígérkező projektbe, amelynek a főemlősök látórendszerének a visszafejtése a célja. Pillanatnyilag még csak néhány nagyon egyszerű architektúrát derítettünk fel, köztük lényegében a viszonylag kevés rétegből álló, előrecsatolt architektúrákat... Az elkövetkező években igyekezni fogunk a lehető legtöbb számítástechnikai trükköt bevetni, amit a főemlősök és az emberek látórendszere alkalmaz. Ami még fontosabb, úgy tűnik, hogy a neuron módszer alkalmazásával hamarosan lehetséges lesz kifinomult rendszereket kialakítani, amelyek nagyon nagy neuronhálózatokat tudnak majd szimulálni valós időben.” S. J. Thorpe et al., „Reverse Engineering of the Visual System Using Networks of Spiking Neurons” („Látórendszerek visszafejtése neurontüzelési hálózatok felhasználásával”), *Proceedings of the IEEE 2000 International Symposium on Circuits and Systems IV* (IEEE Press), . 405–8. o., <http://www.sccn.ucsd.edu/~arno/mypapers/thorpe.pdf>.

[\[508\]](#) T. Schoenauer et al. írja: „Az elmúlt évek során nagyon sokféle hardvert terveztek a mesterséges neurális hálózatokhoz (MNH)... Ma a neurálishálózat-hardverek széles köréből válogathatunk. Ezek architekturális téren, például a neurochipek, a gyorsítókártyák és többkártyás neuroszámítógépek szempontjából különböznek egymástól, illetve a rendszerek céljait, mint az MNH-algoritmus(ok), továbbá a rendszerek rugalmasságát illetően is. A digitális neurohardverek osztályozhatók a rendszer architektúrája, a párhuzamosság foka, az egy processzorra jutó neurálishálózat-partíciók száma, a processzorok közötti kommunikációs hálózat és a számbábrázolás szempontjából. T. Schoenauer, A. Jahnke, U. Roth és H. Klar, „Digital Neurohardware: Principles and Perspectives” („Digitális neurohardver alapelvek és kilátások”), in *Proc. Neuronale Netze in der Anwendung*–Neural Networks in Applications NN'98, Magdeburg, felkérésre írt cikk (február): 101–6. o., <http://mikro.ee.tu-berlin.de/spinn/pdf/nnida98.pdf>. Lásd még Yihua Liao, „Neural Networks in Hardware: A Survey” („Neurális hálózatok a hardverben: áttekintés”), (2001), http://pdf.aminer.org/000/339/993/advances_in_and_problems_of_the_implementation_of_neural_algorithms.pdf.

[\[509\]](#) A következőkben bemutatok egy genetikai (evolúciós) algoritmus alapvető felépítését. Sok változata lehetséges, és a rendszertervezőknek meg kell adniuk bizonyos kritikus paramétereket és eljárásokat. Részletesebben lásd lentebb.

AZ EVOLÚCIÓS ALGORITMUS

Hozzunk létre N darab megoldás-„lényt”. Mindegyiknek legyen:

- Genetikai kódja: egy számsorozat, ami a probléma egyik lehetséges megoldását jellemzi. A számok reprezentálhatnak kritikus paramétereket, a megoldáshoz vezető lépéseket, szabályokat stb.

Az evolúció minden egyes nemzedéke esetében hajtsuk végre a következő lépéseket:

- Az N darab megoldáslény mindegyikére hajtsuk végre a következőket:

(1) Alkalmazzuk az adott megoldáslénynek a megoldását (ahogyan a genetikai kódja reprezentálja) a problémára vagy a szimulált környezetre.

(2) Értékeljük a megoldást.

- Fogjuk az L legsikeresebb (legmagasabb értékű) megoldáslényt, és hagyjuk tovább élni a következő nemzedékben.

- Iktassuk ki a többi ($N-L$ darab) nem túlélő megoldáslényeket.

- Hozzunk létre $N-L$ darab új megoldáslényt a túlélő L darab megoldáslényből azáltal, hogy:

(1) másolatokat készítünk az L túlélő megoldáslényből. Mindegyik másolaton hajtsunk végre apró, véletlenszerű módosításokat; vagy

(2) hozzunk létre újabb megoldáslényeket az L darab túlélő lény genetikai kódreszeinek kombinálásával („szexuális” úton történő szaporodás révén, vagy a kromoszómáreszek más módon történő kombinálásával); vagy

(3) csináljuk az (1) és (2) kombinációját.

• Döntsük el, folytatni kell-e vagy sem a fejlődést:

Fejlődés = (a nemzedék legmagasabb értéke) – (az előző nemzedék legmagasabb értéke).

Ha Fejlődés < Fejlődési küszöbérték, akkor végeztünk.

• Az evolúció utolsó nemzedékének legjobban teljesítő megoldáslénye rendelkezik a legjobb megoldással. Alkalmazzuk a genetikai kódjában meghatározott megoldást a problémára.

Kulcsfontosságú tervezési döntések

A fenti egyszerű sémában a tervezőnek a kiinduláskor meg kell határoznia:

• A kulcsfontosságú paramétereket:

N

L

Fejlődési küszöbérték

• Mit reprezentálnak a számok a genetikai kódban, és hogyan lehet kiszámítani a megoldást a genetikai kódból.

• Az első nemzedék N megoldáslénye meghatározásának módszerét. Általában elég, ha ezek csak „logikus” megoldási kísérletek. Ha ezek az első nemzedékbeli megoldások túl szerteágazóak, az evolúciós algoritmus nehezen fog a jó megoldás felé konvergálni. Gyakran érdemes úgy létrehozni az első megoldáslényeket, hogy ésszerűen sokfélék legyenek. Ez segít elejét venni annak, hogy az evolúciós folyamat egyszerűen csak egy „lokálisan” optimális megoldást találjon.

• A megoldások értékelési rendszerét.

• A túlélő megoldáslények szaporodásának mikéntjét.

Variációk

A fentiek sokféle változata lehetséges. Például:

• Nem szükséges, hogy minden nemzedékből meghatározott számú megoldáslény (L) maradjon életben. A túlélés szabályai megengedhetik a túlélők változó számát.

• Nem szükséges, hogy az egyes nemzedékekben adott számú új megoldáslény legyen (N–L). A szaporodási szabályok függetlenek lehetnek a populáció nagyságától. A szaporodást össze lehet kapcsolni a túléléssel, lehetővé téve ezzel, hogy a legéletrevalóbb megoldáslények szaporodjanak a legnagyobb számban.

• A döntés, hogy folytatódjék-e az evolúció vagy sem, sok mindentől függhet. Tekintetbe vehetünk mást is, mint a legújabb nemzedék legjobban teljesítő megoldáslényét, például egy trendet, ami túlmutat a legutolsó két nemzedéken.

[\[510\]](http://www.salon.com/2004/08/12/evolvable_hardware/) Sam Williams, „When Machines Breed” („Amikor a gépek szaporodnak”), 2004. augusztus 12. http://www.salon.com/2004/08/12/evolvable_hardware/.

[\[511\]](#) A következőkben bemutatom a rekurzív keresés alapvető felépítését (algoritmusleírását). Sok változata lehetséges, a rendszertervezőknek bizonyos kritikus paramétereket és eljárásokat meg kell határozniuk. Részletesebben lásd lentebb.

A REKURZÍV ALGORITMUS

Definiáljuk a „Válaszd a legjobb következő lépést” függvényt (programot). A függvény visszatérési értékei: „SIKER” (megoldottuk a problémát) vagy „KUDARC” (nem oldottuk meg). Ha SIKER értékkel tér vissza, akkor a függvény visszaadja azoknak a lépéseknek a sorozatát is, amikkel megoldotta a problémát.

A VÁLASZD A LEGJOBB KÖVETKEZŐ LÉPÉST működése:

• Határozzuk meg, hogy a program ezen a ponton el tudja-e kerülni a rekurzió folytatását. Ez a pont és a következő kettő a kilépési döntéssel foglalkozik.

Először határozzuk meg, hogy megoldódott-e a probléma. Mivel a „Válaszd a legjobb következő lépést” valószínűleg a program maga hívta meg, akár már ekkor is lehet kielégítő megoldásunk. Például:

(1) Egy játék (például a sakk) kontextusában az utolsó lépéssel nyerünk (mattot adunk).

(2) Egy matematikai tétel megoldásának kontextusában az utolsó lépés bebizonyítja a tételt.

(3) Egy művészi program (például egy számítógépes költő vagy zeneszerző) kontextusában az utolsó lépés kielégíti a következő szóra vagy hangjegyre tett megkötetéseket.

Ha a problémát kielégítően megoldottuk, akkor a program a „SIKER” értékkel tér vissza, és a sikeres megoldáshoz elvezető lépések sorával.

• Ha a probléma nem oldódott meg, határozzuk meg, hogy reménytelenné vált-e a probléma megoldása. Például:

(1) Egy játék (például a sakk) kontextusában ezzel a lépéssel veszítünk (mattot kapunk).

(2) Egy matematikai tétel megoldásának a kontextusában ez a lépés olyan eredményt ad, amely ellentmond a tételnek.

(3) Egy művészi alkotás kontextusában a lépés ellentmond a következő szó vagy hangjegy megkötetéseinek.

Ha a megoldás ezen a ponton reménytelenné vált, a program a „KUDARC” értékkel tér vissza.

• Ha a rekurzív folyamatnak ezen a pontján a probléma nem is oldódott meg és nem is tűnik reménytelennek a megoldása, akkor

vizsgáljuk meg, hogy nem kell-e ettől függetlenül felfüggeszteni a rekurzív folyamatot. Ez kulcsfontosságú a tervezés szempontjából, és figyelembe kell venni a rendelkezésre álló korlátozott számítógépidőt. Például:

(1) Egy játék (például a sakk) kontextusában ez a lépés kellő „előnyhöz” vagy „hátrányhoz” juttat minket. Ennek a meghatározása nem feltétlenül egyszerű, és alapvető tervezési döntést igényel. Mindazonáltal egyszerű módszerekkel (például a bábuértékek összeadásával) még mindig jó eredményekre juthatunk. Ha a program arra jut, hogy kellő előnyt szereztünk, akkor a „Válaszd a legjobb következő lépést” hasonlóképpen tér vissza, mint amikor arra a megállapításra jutott, hogy győztünk (azaz a „SIKER” értékkel). Ha a program arra jut, hogy túl nagy hátrányba kerültünk, a „Válaszd a legjobb következő lépést” hasonlóképpen tér vissza, mint amikor arra a megállapításra jutott, hogy veszítettünk (azaz a „KUDARC” értékkel).

(2) Egy matematikai tétel megoldásának kontextusában ennek a lépésnek a során meghatározásra kerül, hogy a bizonyítás lépéssorozata milyen valószínűséggel vezet el a bizonyításhoz. Ha valószínűleg nem vezet el, akkor ezt a megoldási kísérletet el kell vetni, és a „Válaszd a legjobb következő lépést” hasonlóképpen tér vissza, mint amikor arra a megállapításra jutott, hogy a lépés ellentmond a tételnek (azaz a „KUDARC” értékkel). A sikernek nincs hasonló „tág” megfelelője. Addig nem adhatjuk vissza a „SIKER” értéket, amíg ténylegesen és konkrétan meg nem oldottuk a problémát. Ilyen a matematika.

(3) Egy művészi program kontextusában (például egy számítógépes költő vagy zeneszerző esetében) ennek a lépésnek a során meghatározzuk, hogy a lépések sorozata (például két szó egy versben vagy a hangjegyek egy dalban) valószínűleg nem elégítik ki a következő lépés célkitűzéseit. Ha nem, akkor ezt a próbálkozást el kell vetni, és a „Válaszd a legjobb következő lépést” hasonlóképpen tér vissza, mint amikor arra a megállapításra jutott, hogy a lépés ellentmond a következő lépés célkitűzéseinek (azaz a „KUDARC” értékkel).

- Ha a „Válaszd a legjobb következő lépést” nem tért vissza (mert a program nem állapított meg sem sikert, sem kudarcot, és nem döntött úgy, hogy ezt a megoldási próbálkozást ezen a ponton el kell vetni), akkor nem léptünk ki a rekurzív folyamatból. Ebben az esetben létrehozunk egy listát az összes lehetséges további lépésről. Itt jön a képbe a probléma pontos megfogalmazása:

(1) Egy játék (például a sakk) kontextusában létre kell hozni az aktuális állásbaűn megtehető összes lehetséges lépésünket. Ehhez egyértelműen le kell fektetni a játék szabályait.

(2) Egy matematikai tétel bizonyításának a kontextusában fel kell sorolni a bizonyítás ezen pontján alkalmazható axiómákat vagy korábban bizonyított tételeket.

(3) Egy kibernetikus művészi program kontextusában fel kell sorolni a lehetséges szó/hangjegy/sor töredékeket, amiket ezen a ponton fel lehet használni.

Az összes ilyen lehetséges következő lépés esetében:

(1) Hozzuk létre a lépés megtételével kialakuló hipotetikus helyzetet. A sakkjátékban ez egy új játékalást jelent. A matematikai bizonyításban a lépés hozzáadását a bizonyításhoz. Egy művészi programban az adott szó/hangjegy/sor töredék hozzáadását.

(2) Most hívjuk meg a „Válaszd a legjobb következő lépést” függvényt, hogy vizsgálja meg a kialakult hipotetikus helyzetet. Természetesen itt lép be a képbe a rekurzió, hiszen a program most saját magát hívja meg.

(3) Ha a „Válaszd a legjobb következő lépést” fenti hívása „SIKER” értékkel tér vissza, akkor a „Válaszd a legjobb következő lépést” ezen példánya (amiben most vagyunk) szintén „SIKER” értékkel tér vissza. Egyéb esetben mérlegelje a listában szereplő következő lehetséges lépést.

Ha az összes lehetséges lépés mérlegelésre került, és egyik sem eredményezett „SIKER” visszatérést a „Válaszd a legjobb következő lépést”-ből, akkor a „Válaszd a legjobb következő lépést”-nek ez a meghívása (amiben vagyunk) térjen vissza „KUDARC” értékkel.

A VÁLASZD A LEGJOBB KÖVETKEZŐ LÉPÉST vége

Ha a „Válaszd a legjobb következő lépést” eredeti hívása „SIKER” értékkel tér vissza, a lépések helyes sorát is vissza fogja adni:

(1) Egy játék kontextusában ennek a sorozatnak az első lépése az a lépés, amit meg kell tennünk.

(2) A matematikai bizonyítás kontextusában a lépések teljes sorozata maga a bizonyítás.

(3) Egy kibernetikus művészi program kontextusában a lépések sorozata a műalkotás.

Ha a „Válaszd a legjobb következő lépést” „KUDARC” értékkel tér vissza, akkor vissza kell térni a tervezőasztalhoz.

Kulcsfontosságú tervezési döntések

A fenti egyszerű sémában a rekurzív algoritmus tervezőjének az elején meg kell határoznia a következőket:

- A rekurzív algoritmus kulcsa annak a meghatározása a „Válaszd a legjobb következő lépést”-ben, hogy mikor kell kilépni a rekurzív folyamatból. Ez könnyű, amikor a program egyértelmű sikert ért el (például a mattot a sakkban vagy a helyes megoldást egy matematikai vagy kombinatorikai problémában), vagy egyértelmű kudarcot. Sokkal nehezebb, amikor nem jutott el az egyértelmű sikerig vagy kudarcig. Egy vizsgálódási irány elhagyása a konkrét végeredmény nélkül azért szükséges, mert egyébként a program évmilliárdokig futna (vagy legalábbis a számítógép garanciájának lejártáig).

- A rekurzív algoritmus másik alapvető követelménye a probléma egyértelmű megfogalmazása. Egy olyan játékban, mint a sakk, ez könnyű. Ám más helyzetekben nem mindig ilyen könnyű a probléma egyértelmű megfogalmazása.

[\[512\]](#) Ray Kurzweil kibernetikus költőjének további leírását lásd: Kurzweil CyberArt, <http://www.KurzweilCyberArt.com>. Ugyanitt ingyenesen letölthető a program is. Lásd U.S. Patent No. 6,647,395, „Poet Personalities” („Költőszemélyiségek”), feltaláló: Ray Kurzweil

és John Keklak. Kivonat: „Módszer költőszemélyiség létrehozására, beleértve a versek olvasását is, mely versek mindegyike szöveget tartalmaz; elemző modellek létrehozása, mely elemző modellek mindegyike egy-egy verset reprezentál; és az elemző modellek tárolása személyiség-adatstruktúrában. A személyiség-adatstruktúra emellett tartalmaz súlyozásokat is, mely súlyozások mindegyike párosítva van minden egyes elemző modellel. A súlyozások egész számértékek.”

{513} Ben Goertzel: *The Structure of Intelligence (Az intelligencia struktúrája)*, (New York: Springer-Verlag, 1993); *The Evolving Mind (A fejlődő elme)*, (Gordon and Breach, 1993); *Chaotic Logic (Kaotikus logika)*, (Plenum, 1994); *From Complexity to Creativity (A komplexitástól a kreativitásig)*, (Plenum, 1997). Ben Goertzel könyveit és esszéit lásd: <http://www.goertzel.org/work.html>.

{514} A KurzweilAI.net-en (<http://www.KurzweilAI.net>) több száz „nagy gondolkodó” több száz cikke található meg a „gyorsuló intelligenciáról”. A honlap emellett ingyenes napi vagy heti hírlevelet kínál a könyvben tárgyalt területek legújabb eredményeiről. A feliratkozáshoz mindössze az e-mail címet kell megadni (amit szigorúan bizalmasan kezelünk és nem adunk ki harmadik félnek).

{515} John Gosney, Business Communications Company, „Artificial Intelligence: Burgeoning Applications in Industry” („Mesterséges intelligencia: egyre kiterjedtebb alkalmazások az iparban”), 2003. június, <http://www.bccresearch.com/comm/G275.html>.

{516} Kathleen Melymuka, „Good Morning, Dave...” („Jó reggelt, Dave...”, *Computerworld*; 2002. november 11., <http://www.computerworld.com/industrytopics/defense/story/0,10801,75728,00.html>.

{517} JTRS Technology Awareness Bulletin, 2004. augusztus.

{518} Otis Port, Michael Arndt és John Carey, „Smart Tools” („Okos szerszámok”), 2003. tavasz, <http://www.businessweek.com/bw50/content/mar2003/a3826072.htm>.

{519} Wade Roush, „Immobots Take Control: From Photocopiers to Space Probes, Machines Injected with Robotic Self-Awareness Are Reliable Problem Solvers” („Az immobotok átveszik az irányítást: a fénymásolóktól az űrszondáig a robotikus öntudattal felruházott gépek megbízható problémamegoldók”), *Technology Review* (2002. december–2003. január), <http://www.occm.de/roush1202.pdf>.

{520} Jason Lohnt idézi a NASA sajtóközleménye: „NASA „Evolutionary” Software Automatically Designs Antenna” („A NASA »evolúciós« szoftvere automatikusan tervez antennákat”), http://www.nasa.gov/mission_pages/st-5/main/04-55AR.html.

{521} Robert Roy Britt, „Automatic Astronomy: New Robotic Telescopes See and Think” („Automatizált csillagászat: az új robotteleszkópok látnak és gondolkodnak”), 2003. június 4., <http://www.space.com/>.

{522} H. Keith Melton, „Spies in the Digital Age” („Kémek a digitális korban”), <http://cryptome.org/jya/melton.htm>.

{523} „A United Therapeutics (UT) egy biotechnológiai vállalat, ami krónikus terápiákat fejleszt ki életveszélyes betegségekre három terápiás területen: a kardiovaszkuláris betegségek, az onkológia és a fertőző betegségek területén” (<http://www.unither.com>). A Kurzweil Technologies együttműködik a UT-vel mintázatfelismerésen alapuló elemzés kidolgozásán, akár „Holter” (huszonnégy órás), akár „Esemény” (harminc napig vagy tovább tartó) megfigyelések adatai alapján.

{524} Kristen Philipkoski, „A Map That Maps Gene Functions” („A gének funkcióit feltérképező térkép”), *Wired News*, 2002. május 28., <http://www.wired.com/news/medtech/0,1286,52723,00.html>.

{525} Jennifer Ouellette, „Bioinformatics Moves into the Mainstream” („A »bioinformatika« kifejezés a közbeszéd részévé válik”), *The Industrial Physicist* (2003. október–november), <http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-9/iss-5/p14.html>.

{526} Port, Arndt és Carey, „Smart Tools” („Okos szerszámok”).

{527} „Protein Patterns in Blood May Predict Prostate Cancer Diagnosis” („A vér fehérjemintázatai előrejelezhetik a prosztatatarakot”), National Cancer Institute, 2002. október 15., <http://www.nih.gov/news/pr/oct2002/nci-15.htm>, beszámoló Emanuel F. Petricoin et al., „Serum Proteomic Patterns for Detection of Prostate Cancer” („Szérum-proteomikus mintázatok a prosztatatarák felfedezéséhez”), *Journal of the National Cancer Institute* 94 (2002): 1576–78. o.

{528} Charlene Laino, „New Blood Test Spots Cancer” („Az új vértesztek kimutatják a rákot”), 2002. december 13.; Emanuel F. Petricoin III et al., „Use of Proteomic Patterns in Serum to Identify Ovarian Cancer” („Szérumok proteomikus mintázatának felhasználása a petefészekrák azonosításához”), *Lancet* 359.9306 (2002. február 16): 572–77. o.

{529} A TriPath’s FocalPointjáról lásd „Make a Diagnosis” („Alkossunk diagnózist”), *Wired*, 2003. október, <http://www.wired.com/wired/archive/10.03/everywhere.html?pg=5>. Mark Hagland, „Doctors’ Orders” („Az orvos utasítására”), 2003. január, <http://www.healthcare-informatics.com/>.

{530} Ross D. King et al., „Functional Genomic Hypothesis Generation and Experimentation by a Robot Scientist” (Egy robotkutató funkcionális genom hipotézisének alkotása és kísérletei”), *Nature* 427 (2004. január 15): 247–52. o.

{531} Port, Arndt és Carey, „Smart Tools” („Okos szerszámok”).

{532} „Future Route Releases AI-Based Fraud Detection Product” („A Future Route MI-alapú csalásérzékelő terméket bocsát ki”), 2004. augusztus 18.

- [\[533\]](#) John Hackett, „Computers Are Learning the Business” („A számítógépek kezdenek beletanulni a szakmába”), *CollectionsWorld*, 2001. április 24.
- [\[534\]](#) „Innovative Use of Artificial Intelligence, Monitoring NASDAQ for Potential Insider Trading and Fraud” („A mesterséges intelligencia innovatív felhasználása: a NASDAQ figyelése az esetleges bennfentes kereskedés és csalások leleplezésére”), AAAI-sajtóközlemény, 2003. július 30., <http://www.aaai.org/Pressroom/Releases/release-03-0730.pdf>.
- [\[535\]](#) „Adaptive Learning, Fly the Brainy Skies” („Adaptív tanulás, határ a csillagos ég”), *Wired News*, 2002. március <http://www.wired.com/wired/archive/10.03/everywhere.html?pg=2>.
- [\[536\]](#) „Introduction to Artificial Intelligence” („Bevezetés a mesterséges intelligenciába”), EL 629, Maxwell Air Force Base, Air University Library kurzus. Sam Williams, „Computer, Heal Thyself” („Számítógép: gyógyítsd meg magad!”), *Salon.com*, 2004. július 12., http://www.salon.com/tech/feature/2004/07/12/self_healing_computing/index_np.html.
- [\[537\]](#) Lásd <http://www.Seegrid.com>. Nyilatkozat: A szerző a Seegrid befektetője és az igazgatótanács tagja.
- [\[538\]](#) No Hands Across America honlap, http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/usr/tjochem/www/nhaa/nhaa_home_page.html, és „Carnegie Mellon Researchers Will Prove Autonomous Driving Technologies During a 3,000 Mile, Hands-off-the-Wheel Trip from Pittsburgh to San Diego” („A Carnegie Mellon kutatói egy 3000 mérföldes, kormányzás nélküli, Pittsburgh-ből San Diegóba vezető utazás során fogják bebizonyítani az önálló vezetési technológiák működőképességét”), Carnegie Mellon-sajtóközlemény, http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/usr/tjochem/www/nhaa/official_press_release.html; Robert J. Derocher, „Almost Human” („Szinte emberi”), 2001. szeptember.
- [\[539\]](#) „Search and Rescue Robots” („Kereső- és mentőrobotok”), Associated Press, 2004. szeptember 3., <http://www.smh.com.au/articles/2004/09/02/1093939058792.html>.
- [\[540\]](#) „From Factoids to Facts” („A ténymorzsáktól a tényekig”), *Economist*, 2004. augusztus 26., <http://www.economist.com/node/3127462>.
- [\[541\]](#) Joe McCool, „Voice Recognition, It Pays to Talk” („Hangfelismerés, megéri beszélni”), 2003. május <http://www.bcs.org/BCS/Products/Publications/JournalsAndMagazines/ComputerBulletin/OnlineArchive/may03/voicerecognition.htm>.
- [\[542\]](#) John Gartner, „Finally a Car That Talks Back” („Végre egy kocsi, ami visszabeszél”), *Wired News*, 2004. szeptember 2., http://www.wired.com/news/autotech/0,2554,64809,00.html?tw=wn_14techhead.
- [\[543\]](#) „Computer Language Translation System Romances the Rosetta Stone” („Számítógépes nyelvi fordítói rendszer kacékkordik a Rosette-i kővel”), Information Sciences Institute, USC School of Engineering (2003. július 24.), http://www3.isi.edu/about-news_story.htm?s=65.
- [\[544\]](#) Torsten Reilt idézi Steven Johnson, „Darwin in a Box” („Darwin egy dobozban”), *Discover* 24.8 (2003. augusztus).
- [\[545\]](#) „Let Software Catch the Game for You” („Majd a szoftver elkapja a vadat”), 2004. július 3., <http://www.newscientist.com/article/dn6097-let-software-catch-the-game-for-you.html>.
- [\[546\]](#) Michelle Delio, „Breeding Race Cars to Win” („Győzelemre tenyésztett versenyautók”), *Wired News*, 2004. június 18., <http://www.wired.com/news/autotech/0,2554,63900,00.html>.
- [\[547\]](#) Marvin Minsky, *The Society of Mind (Az elme társadalma)*, (New York: Simon & Schuster, 1988).
- [\[548\]](#) Hans Moravec, „When Will Computer Hardware Match the Human Brain?” („Mikor fog felérni a számítógépek hardvere az emberi aggyal?”), *Journal of Evolution and Technology* 1 (1998).
- [\[549\]](#) Ray Kurzweil, *The Age of Spiritual Machines (A spirituális gépek kora: amikor a számítógépek meghaladják az emberi intelligenciát)*, (New York: Viking, 1999), 156. o.
- [\[550\]](#) Lásd második fejezet, [\[65\]](#) és [\[66\]](#) jegyzetek.
- [\[551\]](#) „The First Turing Test” („Az első Turing-teszt”), <http://www.loebner.net/Prizetf/loebner-prize.html>.
- [\[552\]](#) Douglas R. Hofstadter, „A Coffeehouse Conversation on the Economy’s Turing Test” („Kávéházi beszélgetés a gazdaság Turing-tesztjéről”), 1981. május, megtalálható in: Ray Kurzweil, *The Age of Intelligent Machines (Az intelligens gépek kora)*, (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1990), 80–102. o., <http://www.KurzweilAI.net/>.
- [\[553\]](#) Ray Kurzweil, „Why I Think I Will Win” („Miért gondolom, hogy én fogok győzni?”) és Mitch Kapor, „Why I Think I Will Win” („Miért gondolom, hogy én fogok győzni?”) szabályok: <http://www.kurzweilai.net/a-wager-on-the-turing-test-the-rules>; Kapor: <http://www.kurzweilai.net/why-i-think-i-will-win>; Kurzweil: <http://www.kurzweilai.net/a-wager-on-the-turing-test-why-i-think-i-will-win>; Kurzweil „utolsó szó”: <http://www.kurzweilai.net/response-to-mitchell-kapor-s-why-i-think-i-will-win>.
- [\[554\]](#) Edward A. Feigenbaum, „Some Challenges and Grand Challenges for Computational Intelligence” („Néhány nagy és pár még nagyobb kihívás a számítástechnikai intelligencia előtt”), *Journal of the Association for Computing Machinery* 50 (2003. január): 32–

[\[555\]](#) Az eukarióta evolúció sorozatos endoszimbiózis elmélete szerint a mitokondriumok (azok a sejtekben lévő struktúrák, amelyek energiát termelnek, és saját, az emberekben tizenhárom génből álló genetikai kóddal rendelkeznek) ősei eredetileg önálló baktériumok voltak (azaz nem egy másik sejt részét alkották), hasonlóan a mai *Daptobacter* baktériumhoz. „Serial Endosymbiosis Theory” („A sorozatos endoszimbiózis elmélete”), <http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Serial%20endosymbiosis%20theory>.

[\[556\]](#) Donovan, „Season of the Witch” („A boszorkány évada”), Sunshine Superman (1966).

[\[557\]](#) A mezőgazdasági munkaerő csökkenésének okai között szerepel a gépesítés, ami csökkentette az igényt az állati és emberi munkaerőre; a gazdasági lehetőségek, melyek a második világháború idején keletkeztek a városokban; és az intenzív földművelési módszerek kifejlesztése, amelyek miatt hasonló mennyiségű terméshez kevesebb földre lett szükség. U.S. Mezőgazdasági Minisztérium. National Agricultural Statistics Service, Trends in U.S. Agriculture, http://www.nass.usda.gov/Publications/Trends_in_U.S._Agriculture/. A számítógép-vezérelt termelés, a just-in-time jellegű gyártásszervezés (amelynek eredményeképpen csökkentek a raktárkészletek) és a gyártás külföldre vitele a költségek csökkentése érdekében egyaránt hozzájárultak az ipari munkahelyek számának visszaszorulásához. See U.S. Munkaügyi Minisztérium, Futurework: Trends and Challenges of Work in the 21st Century (A jövő munkája: trendek és kihívások a XXI. században), <http://www.dol.gov/oasam/programs/history/herman/reports/futurework/report.htm>.

[\[558\]](#) Natasha Vita-More, „The New [Human] Genre Primo [First] Posthuman” („Az új [emberi] nem a primo [első] poszthumán”), a Ciber@RT konferencián, Bilbaóban, 2004. áprilisában elhangzott előadás, <http://www.natasha.cc/paper.htm>.

[\[559\]](#) Rashid Bashir 2004-ben így foglalta össze:

Sok fejlődés történt a terápiás mikro- és nanotechnológiában is... A konkrét példák között említhető: (1) szilíciumalapú beültethető eszközök, melyeken elektronikus vezérléssel rés nyitható, ahol kibocsátják magukból az előre betöltött gyógyszereket, (2) elektromosan irányítható – szelepként vagy karként funkcionáló – polimerekkel felszerelt szilíciumeszközök, melyek funkciója szintén az előre betöltött gyógyszerhatóanyagok kibocsátása, (3) szilíciumalapú mikrokapszulák nanoporózus hártáival az inzulin kibocsátására, (4) tisztán polimer (vagy hidrogél) részecskék, melyekbe gyógyszerhatóanyagokat lehet tölteni, és amelyek meghatározott környezeti feltételek hatására – például a pH-érték változására – megnyílnak és kibocsátják a beléjük töltött hatóanyagokat, (5) felismerő fehérjékkel bevont fém nanorészecskék, melyek külső optikai energiával felmelegíthetők, és így lokálisan képesek felmelegíteni és elpusztítani a nemkívánatos sejteket és szöveteket stb.

[\[560\]](#) R. Bashir, „BioMEMS: State-of-the-Art in Detection, Opportunities and Prospects” („BioMEMS: csúcstechnológia a felderítésben, lehetőségek és kilátások”), *Advanced Drug Delivery Reviews* 56.11 (2004. szeptember 22.): 1565–86. o. Lásd még Richard Grayson et al., „A BioMEMS Review: MEMS Technology for Physiologically Integrated Devices” („BioMEMS-áttekintés: MEMS-technológia a fiziológiailag integrált eszközökben”), *IEEE Proceedings* 92 (2004): 6–21. o. Az International Society for BioMEMS and Biomedical Nanotechnology tevékenységét illetően lásd <http://www.bme.ohio-state.edu/isb>. A BioMEMS-konferenciák szintén fel vannak tüntetve az SPIE honlapján, <http://www.spie.org/Conferences>.

[\[561\]](#) A kutatók arany nanorészecskét használtak a vércukorszint mérésére cukorbetegknél. Y. Xiao et al., „Plugging into Enzymes’: Nanowiring of Redox Enzymes by a Gold Nanoparticle” („Rákapcsolódás az enzimekre: A redoxenzimek nanobehuzalozása arany nanorészecskével”), *Science* 299.5614 (2003. március 21.): 1877–81. o. Lásd még T. A. Desai et al., „Abstract Nanoporous Microsystems for Islet Cell Replacement” („Absztrakt nanoporózus mikrorendszerek szigetsejtek pótlására”), *Advanced Drug Delivery Reviews* 56.11 (2004. szeptember 22.): 1661–73. o.

[\[562\]](#) A. Grayson et al., „Multi-pulse Drug Delivery from a Resorbable Polymeric Microchip Device” („Több impulzussal történő gyógyszeradagolás egy felszívható polimer mikrochipeszközből”), *Nature Materials* 2 (2003): 767–72. o.

[\[563\]](#) Q. Bai és K. D. Wise, „Single-Unit Neural Recording with Active Microelectrode Arrays” („Egységes neurális felvétel aktív mikroelektróda-tömbökkel”), *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 48.8 (2001. augusztus): 911–20. o. Wise munkájának tárgyalását lásd J. DeGaspari, „Tiny, Tuned, and Unattached” („Parányi, behangolt és szabad”), *Mechanical Engineering* (2001. július); K. D. Wise, „The Coming Revolution in Wireless Integrated MicroSystems” („A vezeték nélküli integrált mikrorendszerek közelgő forradalma”), *Digest International Sensor Conference 2001* (meghívott plenáris előadó), Szöul, 2001. október. Online változat (2004. január 13.): <http://www.stanford.edu/class/ee392s/Stanford392S-kw.pdf>.

[\[564\]](#) „Microbots’ Hunt Down Disease” („A »mikrobotok« levadászzák a betegségeket”), BBC News, 2001. június 13., <http://news.bbc.co.uk/2/hi/health/1386440.stm>. A mikrogépezetek henger alakú mágneseken alapulnak, lásd K. Ishiyama, M. Sendoh és K. I. Arai, „Magnetic Micromachines for Medical Applications” („Mágneses mikrogépezetek orvosi célokra”), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 242–45., 1. rész (2002. április): 41–46. o.

[\[565\]](#) Lásd a Sandia Nemzeti Laboratórium sajtóközleményét: „Pac-Man-Like Microstructure Interacts with Red Blood Cells” („PacMan-szerű mikrostruktúra lép kölcsönhatásba a vörösvértestekkel”), 2001. augusztus 15., <http://www.sandia.gov/media/NewsRel/NR2001/gobbler.htm>. Az iparág válaszáként született cikket lásd: D. Wilson, „Microteeth Have a Big Bite” („A mikrofogak nagyot harapnak”), 2001. augusztus 17., <http://www.theengineer.co.uk/in-depth/microteeth-have-a-big->

[\[566\]](#) Lásd Freitas könyveit: Nanomedicine (Nanogyógyászat), 1. kötet, Basic Capabilities (Alapvető képességek), (Georgetown: Landes Bioscience, 1999), és Nanomedicine, 2A. kötet, Biocompatibility (Biokompatibilitás), (Georgetown: Landes Bioscience, 2003). Mindkettő szabadon elérhető a <http://www.nanomedicine.com> címen. Lásd még a Foresight Intézet „Nanomedicine” oldalát Robert Freitastól, ami felsorolja jelenlegi technikai munkáit: (<http://www.foresight.org/Nanomedicine/index.html#MedNanoBots>).

[\[567\]](#) Robert A. Freitas Jr., „Exploratory Design in Medical Nanotechnology: A Mechanical Artificial Red Cell” („Kísérleti tervezés az orvosi nanotechnológiában: egy mechanikus mesterséges vörösvértest”), Artificial Cells, Blood Substitutes, and Immobilization Biotechnology 26 (1998): 411–30. o., <http://www.foresight.org.Nanomedicine/Respirocytes.html>.

[\[568\]](#) Robert A. Freitas Jr., „Clottocytes: Artificial Mechanical Platelets” („Clottociták: mesterséges mechanikus vérlemezkék”), Foresight Update no. 41, 2000. június 30., 9–11. o., <http://www.imm.org/Reports/Rep018.html>.

[\[569\]](#) Robert A. Freitas Jr., „Microbivores: Artificial Mechanical Phagocytes” („Mikrobivorok: mesterséges mechanikus fagociták”), Foresight Update no. 44, 2001. március 31., 11–13. o., <http://www.imm.org/Reports/Rep025.html> vagy <http://www.kurzweilai.net/microbivores-artificial-mechanical-phagocytes>.

[\[570\]](#) Robert A. Freitas Jr., „The Vasculoid Personal Appliance” („A vaszkuloid személyes alkalmazás”), Foresight Update no. 48, 2002. március 31., 10–12. o. <http://www.imm.org/Reports/Rep031.html>; a teljes cikk: Robert A. Freitas Jr. és Christopher J. Phoenix, „Vasculoid: A Personal Nanomedical Appliance to Replace Human Blood” („Vaszkuloid: személyes nanoorvoslási alkalmazás az emberi vér pótlására”), Journal of Evolution and Technology 11 (2002. április), <http://www.jetpress.org/volume11/vasculoid.html>.

[\[571\]](#) Carlo Montemagno és George Bachand, „Constructing Nanomechanical Devices Powered by Biomolecular Motors” („Biomolekuláris motorok által hajtott nanomechanikus eszközök építése”), Nanotechnology 10 (1999): 225–31. o., „Biofuel Cell Runs on Metabolic Energy to Power Medical Implants” („Metabolikus energiával működő bioüzemanyag-cella az orvosi implantátumok energiaellátásához”), Nature online, 2002. nov. 12., <http://www.nature.com/news/2002/021111/full/021111-1.html>, beszámoló N. Mano, F. Mao és A. Heller, „A Miniature Biofuel Cell Operating in a Physiological Buffer” („Fiziológiai pufferben működő miniatűr bioüzemanyag-cella”), Journal of the American Chemical Society 124 (2002): 12962–63. o.; Carlo Montemagno et al., „Self-Assembled Microdevices Driven by Muscle” („Izomerővel hajtott önösszeszerelő mikroeszközök”), Nature Materials 4.2 (2005. február): 180–84. o., elektronikus megjelenés, (2005. január 16.).

[\[572\]](#) Lásd a Lawrence Livermore Nemzeti Laboratórium honlapját: (<http://www.llnl.gov>) a kezdeményezésről feltöltött információkat illetően, illetve a Medtronic MiniMed honlapját www.medtronic.com/HU/about/minimed.html.

[\[573\]](#) „Az agytól agyig történő közvetlen kommunikáció... inkább a hollywoodi filmekbe való, mint a kormányzati jelentésekbe – de többek között ezt a fejlődést jósolja a U. S. National Science Foundation and Department of Commerce.” G. Brumfiel, „Futurists Predict Body Swaps for Planet Hops” („A futurologusok előrejelzése szerint testeket fogunk cserélni, hogy átugorjunk egyik bolygóról a másikra”), Nature 418 (2002. július 25.): 359. o.

A mélyagyi stimulálás, ami révén a beültetett elektródákból érkező elektromos áram hatással van az agy működésére, nem más, mint egy, az FDA által is jóváhagyott, a Parkinson-kór és egyéb mentális rendellenességek kezelésére szánt neurális implantátum segítségével történő kezelés. Lásd Al Abbott, „Brain Implants Show Promise Against Obsessive Disorder” („Az agyi implantátumok ígéretesnek tűnnek a makacs rendellenességekkel szemben”), Nature 419 (2002. október 17.): 658. o., és B. Nuttin et al., „Electrical Stimulation in Anterior Limbs of Internal Capsules in Patients with Obsessive-Compulsive Disorder” („A belső tok elülső nyúlványainak elektromos stimulálása megrögzött-kényszeres betegeknél”), Lancet 354.9189 (1999. október 30.): 1526. o.

[\[574\]](#) Lásd a Retinal Implant Project honlapját (<http://www.bostonretinalimplant.org>), ahol számos forrás található, köztük a legújabb tanulmányok is. Ezek közül az egyik: R. J. Jensen et al., „Thresholds for Activation of Rabbit Retinal Ganglion Cells with an Ultrafine, Extracellular Microelectrode” („A nyúl retina-ganglionsejtjeinek ultravékony, sejten kívüli mikroelektródával való aktiválásának küszöbe”), Investigative Ophthalmology and Visual Science 44.8 (2003. augusztus): 3533–43. o.

[\[575\]](#) Az FDA 1997-ben csak az agy egyik oldalára hagyta jóvá az erre a célra szolgáló Medtronic implantátumot; mindkét oldalra csak 2002. január 14-én kapott jóváhagyást. S. Snider, „FDA Approves Expanded Use of Brain Implant for Parkinson’s Disease” („Az FDA jóváhagyta a Parkinson-kór kezelésére szolgáló agyi implantátum szélesebb körű alkalmazását”), U.S. Food and Drug Administration, FDA Talk Paper, 2002. január 14. A legújabb változatok szoftverét már kívülről is lehet frissíteni.

[\[576\]](#) A Medtronic szélütésre is készít implantátumot. Lásd S. Hart, „Brain Implant Quells Tremors” („Az agyi implantátum csillapítja a remegést”) ABC News, 1997. december 23. Lásd még a Medtronic honlapját, <http://www.medtronic.com>.

[\[577\]](#) Günther Zeck és Peter Fromherz, „Noninvasive Neuroelectronic Interfacing with Synaptically Connected Snail Neurons Immobilized on a Semiconductor Chip” („Nem invazív neuroelektronikus interfész, félvezető chipen immobilizált szinaptikusan összekapcsolt csiganeuronokkal”), Proceedings of the National Academy of Sciences 98.18 (2001. augusztus 28.): 10457–62. o.

[\[578\]](#) Lásd R. Colin Johnson, „Scientists Activate Neurons with Quantum Dots” („A tudósok kvantumpöttyökkel aktiválják a

neuronokat”), EE Times, 2001. december 4., <http://www.eetimes.com/story/OEG20011204S0068>. A kvantumpöttyöket képzalkotásra is lehet használni; lásd M. Dahan et al., „Diffusion Dynamics of Glycine Receptors Revealed by Single-Quantum Dot Tracking” („A glicinreceptorok diffúziódinamikájának feltárása egy kvantumpöttyös nyomkövetéssel”), Science 302.5644 (2002. október 17., 2003): 442–45. o.; J. K. Jaiswal és S. M. Simon, „Potentials and Pitfalls of Fluorescent Quantum Dots for Biological Imaging” („A fluoreszkáló kvantumpöttyök lehetőségei és buktatói a biológiai képzalkotásban”), Trends in Cell Biology 14.9 (2004. szeptember): 497–504. o.

[\[579\]](#) S. Shoham et al., „Motor-Cortical Activity in Tetraplegics” („Motoros-agykérgi aktivitás végtagbénulás esetén”), Nature 413.6858 (2001. október 25.): 793. o. A Utah Egyetem sajtóközleményét lásd: „An Early Step Toward Helping the Paralyzed Walk” („Az első lépés a bénultak mozgásképesé tétele felé”), 2001. október 24.

[\[580\]](#) Stephen Hawking megjegyzéseit, melyeket a Focus félrefordított, idézte Nick Paton Walsh, „Alter Our DNA or Robots Will Take Over, Warns Hawking” („Hawking figyelmeztetése: változtassuk meg a DNS-ünket, vagy a robotok átveszik a hatalmat”), Observer, 2001. szeptember 2., http://observer.guardian.co.uk/uk_news/story/0,6903,545653,00.html. A széles nyilvánosságot kapott félrefordítás azt sugallta, mintha Hawking az emberinél okosabb gépi intelligencia ellen szólalt volna fel. Valójában azt szorgalmazta, hogy gyorsítsuk a biológiai és nem biológiai intelligencia közötti kapcsolat létrehozását. Hawking a KurzweilAI.net rendelkezésére bocsátotta a pontos idézetet („Hawking Misquoted on Computers Taking Over” („Rosszul idézték Hawking szavait a számítógépek hatalomátvételéről”) 2001. szeptember 13.

[\[581\]](#) Lásd az első fejezet [\[40\]](#) jegyzetét.

[\[582\]](#) Az egyik példája, a „Nomad for Military Applications”, a Microvision cég terméke.

[\[583\]](#) Olga Kharif, „Your Lapel Is Ringing” („Csörög a gallérod”), Business Week, 2004. június 21.

[\[584\]](#) Laila Weir, „High-Tech Hearing Bypasses Ears” („A high-tech hallás élesebb a fülhél”), Wired News, 2004. szeptember 16., http://www.wired.com/news/technology/0,1282,64963,00.html?tw=wn_tophead_4.

[\[585\]](#) Hypersonic Sound technológia, www.atcsd.com/pdf/HSSdatasheet.pdf; Audio Spotlight, <http://www.holosonics.com/technology.html>.

[\[586\]](#) Phillip F. Schewe és Ben Stein, American Institute of Physics Bulletin of Physics News 236 (1995. augusztus 7.), <http://www.aip.org/enews/physnews/1995/physnews.236.htm>. Lásd még R. Weis és P. Fromherz, „Frequency Dependent Signal-Transfer in Neuron-Transistors” („Frekvenciafüggő jelátvitel neurontranszistorokban”), Physical Review E 55 (1997): 877–89. o.

[\[587\]](#) Lásd a [\[573\]](#) jegyzetet fent. Lásd még J. O. Winter et al., „Recognition Molecule Directed Interfacing Between Semiconductor Quantum Dots and Nerve Cells” („Felismerő molekula által vezérelt interfész félvezető kvantumpöttyök és idegsejtek között”), Advanced Materials 13 (2001. november): 1673–77. o.; I. Willner és B. Willner, „Biomaterials Integrated with Electronic Elements: En Route to Bioelectronics” („Elektronikus alkatrészekkel integrált biológiai anyagok: úton a bioelektronika felé”), Trends in Biotechnology 19 (2001. június): 222–30. o.; Deborah A. Fitzgerald, „Bridging the Gap with Bioelectronics” („A szakadék áthidalása bioelektronikával”), Scientist 16.6 (2002. március 18.): 38. o.

[\[588\]](#) Robert Freitas elemzi ezt a forgatókönyvet: Robert A. Freitas Jr., Nanomedicine, 1. kötet, Basic Capabilities, 7.4.5.4. szakasz, „Cell Message Modification” („Sejtüzenet-módosítás”), (Georgetown: Landes Bioscience, 1999), 194–96. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.4.5.4.htm#p5>, 7.4.5.6. szakasz, „Outmessaging to Neurons” („Üzenetküldés neuronoknak”), 196–97. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.4.5.6.htm#p2>.

[\[589\]](#) A Ramona projekt leírását a TED-konferencián bemutatott virtuálisvalóság-prezentáció videofelvételével együtt, az „Így készült a Ramona” című werkfilmet illetően lásd: „All About Ramona” („Mindent Ramonáról”), <http://www.KurzweilAI.net/>.

[\[590\]](#) I. Fried et al., „Electric Current Stimulates Laughter” („Az elektromos áram nevetést vált ki”), Nature 391.6668 (1998. február 12.): 650. o. Lásd Ray Kurzweil, The Age of Spiritual Machines (A spirituális gépek kora), (New York: Viking, 1999).

[\[591\]](#) Robert A. Freitas Jr., Nanomedicine, 1. kötet, Basic Capabilities, 7.3. szakasz, „Communication Networks” („Kommunikációs hálózatok”), (Georgetown: Landes Bioscience, 1999.), 186–88. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/7.3.htm>.

[\[592\]](#) Allen Kurzweil, The Grand Complication: A Novel (A nagy komplikáció), (New York: Hyperion, 2002); Allen Kurzweil, A Case of Curiosities (Ritkaságok), (New York: Harvest Books, 2001). Allen Kurzweil az unokatestvérem.

[\[593\]](#) Ahogyan idézi Aubrey de Grey, „Engineering Negligible Senescence: Rational Design of Feasible, Comprehensive Rejuvenation Biotechnology” („Az elhanyagolható mértékű öregedés tervezése: racionális terv a kivitelezhető, átfogó megfiatalító biotechnológiára”), Kronos Institute Seminar Series, 2002. február 8.

[\[594\]](#) Robert A. Freitas, Jr. „Death Is an Outrage!” („A halál botrányos!”), előadás az V. Alcor Conference on Extreme Life Extension konferencián, Newport Beach, 2002. november 16. <http://www.rfreitas.com/Nano/DeathIsAnOutrage.htm>.

[\[595\]](#) Cro-Magnon: „30 év vagy kevesebb, gyakran sokkal kevesebb...” http://anthro.palomar.edu/homo2/mod_homo_5.htm.

Egyiptom: Jac J. Janssent idézi Brett Palmer, „Playing the Numbers Game” („A számok versenye”), in *Skeptical Review*, online megjelent 2004. május 5-én, www.theskepticalreview.com/BPNumbersGame1.html.

Európa 1400: Gregory Clark, *The Conquest of Nature: A Brief Economic History of the World (A természet meghódítása: a világ rövid gazdaságtörténete)*, (Princeton University Press, megjelenés előtt, 2005), 5. fejezet, „Mortality in the Malthusian Era” („Halandóság a malthusi korszakban”).

1800: James Riley, *Rising Life Expectancy: A Global History (A várható élettartam növekedésének globális története)*, (Cambridge: Cambridge University Press, 2001), 32–33. o.

1900: <http://www.cdc.gov/nchs/data/tables/2003/03hus027.pdf>.

[\[596\]](#) A múzeum eredetileg Bostonban volt, jelenleg a kaliforniai Mountain View-ban található (<http://www.computerhistory.org>).

[\[597\]](#) Lyman és Kahle a hosszú távú adattárolásról: „A jó papír ötszáz évig is megmarad, a mágnesszalag csak tízig. Amíg vannak aktív szervezetek, amelyek folyamatosan másolatokat készítenek, addig biztonságban vannak az adataink. De nincs hatékony módszerünk arra, hogy ötszáz évig fennmaradó másolatokat készítsünk a digitális anyagokról...” Peter Lyman és Brewster Kahle, „Archiving Digital Cultural Artifacts: Organizing an Agenda for Action” („A digitális kultúra műtárgyainak archiválása: felhívás a cselekvésre”), D-Lib Magazine, 1998. július–augusztus. Stewart Brand írja: „Minden egyes vadonatúj számítógép mögött hosszú sorokban hevernek a kihalt számítógépek, a kihalt médiumok, a kihalt alkalmazások, a kihalt fájlok. Bruce Sterling science fiction-író »a halott médiumok aranykorának« nevezi korunkat, melyben »a legtöbb médium élettartama még egy csomag Twinklesét sem éri el.«” Stewart Brand, „Written on the Wind” („A szélbe írva”), Civilization Magazine, 1998. november (a Long Now terminológiában „01998”), online hozzáférhető: <http://longnow.org/essays/written-wind/>.

[\[598\]](#) A DARPA Information Processing Technology Office részlegének ezirányú projektjét LifeLognak nevezik, <http://www.darpa.mil/> lásd még Noah Shachtman, „A Spy Machine of DARPA’s Dreams” („Egy kémgép, amely a DARPA álma”), Wired News, 2003. május 20., <http://www.wired.com/news/business/0,1367,58909,00.html>; Gordon Bell projektje (a Microsoft számára) a MyLifeBits, <http://research.microsoft.com/research/barc/MediaPresence/MyLifeBits.aspx>; a long Now Foundationt illetően lásd <http://longnow.org>.

{599} Bergeron a Harvard Orvosi Egyetem aneszteziológus tanársegédje és többek között a Bioinformatics Computing (Bioinformatikai számítástechnika), Biotech Industry: A Global, Economic, and Financing Overview (Biotech ipar: globális, gazdasági és pénzügyi áttekintés), és The Wireless Web and Healthcare (A vezeték nélküli web és a gyógyítás) című művek szerzője.

{600} A Long Now Foundation dolgozik egy lehetséges megoldáson: a Rosetta Disken, melynek célja egy hatalmas, többnyelvű szövegarchívum létrehozása, a távoli jövőben máskülönből elvesző információ megőrzése érdekében. Egyedi adattárolási technológiát terveznek használni: kéthüvelykes nikkellemezeket, amelyeken 350 000 oldal fér el, és amelyek becsült élettartama 2000–10 000 év. Lásd: <http://rosettaproject.org/disk/concept/>.

{601} John A. Parmentola, „Paradigm Shifting Capabilities for Army Transformation” („A hadsereg paradigmaváltó szintű átalakítása”), meghívott előadás, SPIE European Symposium on Optics/Photonics in Security and Defence, 2004. október 25–28., elektronikusán elérhető: Bridge 34.3 (2004. ősz).

{602} Fred Bayles, „High-tech Project Aims to Make Super-soldiers” („High-tech projekt szuperkatonák létrehozására”), USA Today, 2003. május 23., http://www.usatoday.com/news/nation/2003-05-22-nanotech-usat_x.htm; lásd az Institute for Soldier Nanotechnologies honlapját: <http://web.mit.edu/isn/>; Sarah Putnam, „Researchers Tout Opportunities in Nanotech” („A kutatók üdvözlők a nanotechnológia lehetőségeit”), MIT News Office, 2002. október 9., <http://web.mit.edu/newsoffice/2002/cdc-nanotech-1009.html>.

{603} Ron Schafer, „Robotics to Play Major Role in Future Warfighting” („A robotikának fontos szerepe lesz a jövő hadviselésében”); Dr. Russell Richards, „Unmanned Systems: A Big Player for Future Forces?” („Ember nélküli rendszerek: a jövő haderőinek főszereplői?”), Unmanned Effects Workshop at the Applied Physics Laboratory, John Hopkins Egyetem, Baltimore, 2003. július 29–augusztus 1.

{604} John Rhea, „NASA Robot in Form of Snake Planned to Penetrate Inaccessible Areas” („A NASA kígyórobotja hozzáférhetetlen helyekre is bejuthat”), Military and Aerospace Electronics, 2000.

{605} Lakshmi Sandhana, „The Drone Armies Are Coming” („Jönnek a drónhadseregek”), Wired News, 2002. augusztus 30., <http://www.wired.com/news/technology/0,1282,54728,00.html>. Lásd még Mario Gerla, Kaixin Xu és Allen Moshfegh, „Minuteman: Forward Projection of Unmanned Agents Using the Airborne Internet” („Minuteman: a vezeték nélküli internetet használó, ember nélküli ágensek előrevetítése”), IEEE Aerospace Conference 2002, Big Sky, Montana, 2002. március: <http://nrlweb.cs.ucla.edu/publication/show/309>.

{606} James Kennedy és Russell C. Eberhart, Yuhui Shi-vel: Swarm Intelligence (Rajintelligencia), (San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001), <http://www.swarmintelligence.org/SIBook/SI.php>.

{607} Will Knight, „Military Robots to Get Swarm Intelligence” („Katonai robotok rajintelligenciával”), 2003. április 25., <http://www.newscientist.com/article/dn3661-military-robots-to-get-swarm-intelligence.html>.

{608} Uo.

{609} S. R. White et al., „Autonomic Healing of Polymer Composites” („Polimer kompozitok öngyógyítása”), Nature 409 (2001. február 15.): 794–97. o., <http://www.autonomic.uiuc.edu/files/NaturePaper.pdf>; Kristin Leutwyler, „Self-Healing Plastics” („Öngyógyító műanyagok”), ScientificAmerican.com, 2001. február 15., <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=self-healing-plastics>.

{610} Sue Baker, „Predator Missile Launch Test Totally Successful” („Teljesen sikeres a Predator kilövési tesztje”), Strategic Affairs, 2001. április 1., <http://www.fas.org/irp/program/collect/docs/man-ipc-predator-010228.htm>.

{611} Lásd OpenCourseWare kurzuslista, <http://ocw.mit.edu/>.

{612} Brigitte Bouissou-t idézi az MIT OpenCourseWare, további idézetek oldala: <http://ocw.mit.edu/> és Eric Bender, „Teach Locally, Educate Globally” („Lokális technika, globális oktatás”), MIT Technology Review, 2004. június, <http://www.technologyreview.com/news/402781/teach-locally-educate-globally/>.

{613} A Kurzweil Educational Systems (<http://www.Kurzweilededu.com>) a diszlexiások számára kínálja a Kurzweil3000 olvasórendszert. Bármilyen könyvet fel tud olvasni a felhasználónak, miközben kiemeli az éppen olvasott szövegrészt az oldalról készített nagy felbontású képen. Számos, a felhasználó olvasási képességét javító funkcióval rendelkezik.

{614} Idézi Natasha Vita-More, „Arterati on Ideas” („Arterati az ideákról”), <http://www.angelfire.com/biz4/otherhalf/vinge02.txt>.

{615} Christine Boese, „The Screen-Age: Our Brains in our Laptops” („A képernyőkorszak: az agyunk a laptopunkban van”), CNN.com, 2004. augusztus 2.

{616} Thomas Hobbes, Leviatán (1651).

{617} Seth Lloyd és Y. Jack Ng, „Black Hole Computers” („Fekete lyuk számítógépek”), Scientific American, 2004. november.

{618} Alan M. MacRobert, „The Allen Telescope Array: SETI’s Next Big Step” („Az Allen-teleszkóptömb: a SETI következő nagy lépése”), Sky & Telescope, 2004. április, <http://www.skyandtelescope.com/resources/seti/3304581.html>.

{619} Uo.

[\[620\]](#) Uo.

[\[621\]](#) C. H. Townes, „At What Wavelength Should We Search for Signals from Extraterrestrial Intelligence?” („Milyen hullámhosszon keressük a földön kívüli intelligencia jeleit?”), *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 80 (1983): 1147–51. o. S. A. Kingsley in *The Search for Extraterrestrial Intelligence in the Optical Spectrum*, (A földön kívüli intelligencia keresése az optikai spektrumban), 2. kötet, S. A. Kingsley és G. A. Lemarchand, szerk. (1996) *Proc. WPIE* 2704: 102–16. 67. o.

[\[622\]](#) N. S. Kardashev, „Transmission of Information by Extraterrestrial Civilizations” („Földön kívüli civilizációk információsugárzása”), *Soviet Astronomy* 8.2 (1964): 217–20. o. Összefoglalja Guillermo A. Lemarchand, „Detectability of Extraterrestrial Technological Activities” („A földön kívüli technológiai tevékenység érzékelhetősége”), *SETIQuest* 1:1, 3–13. o, <http://www.coseti.org/lemarch.htm>.

[\[623\]](#) Frank Drake és Dava Sobel, *Is Anyone Out There? (Van valaki odaát?)*, (New York: Dell, 1994); Carl Sagan és Frank Drake, „The Search for Extraterrestrial Intelligence” („A földön kívüli intelligencia keresése”), *Scientific American* (1975. május): 80–89. o. Egy Drake-egyenlet-kalkulátor megtalálható a http://www.activemind.com/Mysterious/Topics/SETI/drake_equation.html címen.

[\[624\]](#) A Drake-egyenlet számos leírása szerint $1/L$ a bolygó életének az a hányada, ami alatt a rádióadás történik, pedig ezt helyesen a világegyetem élete azon hányadaként kellene értelmezni, mivel nem igazán érdekel minket, hogy a bolygó mennyi ideig létezett, csak az, hogy meddig tartott a rádióadás.

[\[625\]](#) Seth Shostak becslése szerint „tízezer és egymillió között lehet a galaxisban a rádióadók száma”. Marcus Chown, „ET First Contact ‘Within 20 Years’” („Az első földön kívüli kapcsolat »20 éven belül« létrejön”), *New Scientist* 183.2457 (2004. július 24.). Online elérhető: <http://www.newscientist.com/article/dn6189-et-first-contact-within-20-years.html>.

[\[626\]](#) T. L. Wilson, „The Search for Extraterrestrial Intelligence” („A földön kívüli intelligencia keresése”), *Nature*, 2001. február 22.

[\[627\]](#) A legújabb becslések tíz- és tizenötmilliárd év közé teszik. 2002-ben a Hubble űrteleszkóp adatai alapján tett becslés tizenhárom- és tizennégymilliárd év között volt. A Case Western Reserve Egyetem munkatársa, Lawrence Krauss és a Dartmouth Egyetem munkatársa, Brian Chaboyer által közölt tanulmány a csillagok evolúciójára alkalmazta a legújabb felfedezéseket, és arra a következtetésre jutott, hogy a világegyetem kora 95 százalékos biztonsággal 11,2 és 20 milliárd év közé tehető. Lawrence Krauss és Brian Chaboyer, „Irion, the Milky Way’s Restless Swarms of Stars” („Irion, a Tejút nyughatatlan csillagraja”), *Science* 299 (2003. január 3.): 60–62. o. A NASA legújabb kutatásai 13,7 milliárd plusz-mínusz 200 millió évre csökkentették a világegyetem becsült korát. <http://map.gsfc.nasa.gov/news/>.

[\[628\]](#) Idézi Eric M. Jones, „‘Where Is Everybody?’: An Account of Fermi’s Question” („Hol van mindenki?»: Beszámoló Fermi kérdéséről”), Los Alamos National Laboratories, 1985. március, <http://www.osti.gov/accomplishments/documents/fullText/ACC0055.pdf>.

[\[629\]](#) Először vegyük a „tökéletes” hideg laptop (amiről a harmadik fejezetben írtam) becsült 10^{42} számítás per másodperc számítási kapacitását. A Naprendszer tömegét nagyjából azonosnak tekinthetjük a Nap tömegével, ami 2×10^{30} kilogramm. Ennek a tömegnek az egy százalékának az egy huszad része 10^{27} kilogramm. Kilogrammonként 10^{42} számítás per másodperccel számolva 10^{27} kilogramm számítási kapacitása 10^{69} számítás per másodperc. Ha a tökéletes hideg laptop számítási kapacitását 10^{50} számítás per másodpercre becsüljük, az eredmény 10^{77} számítás per másodperc.

[\[630\]](#) Anders Sandberg, „The Physics of Information Processing Superobjects: Daily Life Among the Jupiter Brains” („Az információfeldolgozó szuperobjektumok fizikája: mindennapi élet a Jupiter-agyak között”), *Journal of Evolution and Technology* 5 (1999. december 22.), <http://www.jetpress.org/volume5/Brains2.pdf>.

[\[631\]](#) Freeman John Dyson, „Search for Artificial Stellar Sources of Infrared Radiation” („Mesterséges égi infravörös források keresése”), *Science* 131 (1960. június 3.): 1667–68. o.

[\[632\]](#) Idézi Sandberg, „Physics of Information Processing Superobjects” („Az információfeldolgozó szuperobjektumok fizikája”).

[\[633\]](#) 1994-ben 195,5 milliárd félvezető chipet gyártottak, 2004-ben 433,5 milliárdot. Jim Feldhan, a Semco Research Corporation elnöke, <http://www.semico.com>.

[\[634\]](#) Robert Freitas a robotszondák, különösen az önreplikáló robotszondák egyik fő támogatója volt. Lásd Robert A. Freitas Jr., „Interstellar Probes: A New Approach to SETI” („Csillagközi szondák: a SETI új megközelítése”), *J. British Interplanet. Soc.* 33 (1980. március): 95–100. o., <http://www.rfreitas.com/Astro/InterstellarProbesJBIS1980.htm>; Robert A. Freitas Jr., „A Self-Reproducing Interstellar Probe” („Önreplikáló csillagközi szonda”), *J. British Interplanet. Soc.* 33 (1980. július): 251–64. o., <http://www.rfreitas.com/Astro/ReproJBISJuly1980.htm>; Francisco Valdes és Robert A. Freitas Jr., „Comparison of Reproducing and Nonreproducing Starprobe Strategies for Galactic Exploration” („A szaporodó és nem szaporodó csillagszondák stratégiájának összehasonlítása a galaxis meghódítása szempontjából”), *J. British Interplanet. Soc.* 33 (1980. november): 402–8. o., <http://www.rfreitas.com/Astro/ComparisonReproNov1980.htm>; Robert A. Freitas Jr., „Debunking the Myths of Interstellar Probes” („A csillagközi szondák mítoszainak szertefosztatása”), *AstroSearch* 1 (1983. július–augusztus): 8–9. o., <http://www.rfreitas.com/Astro/ProbeMyths1983.htm>; Robert A. Freitas Jr., „The Case for Interstellar Probes” („Érvek a csillagközi

[\[635\]](#) M. Stenner et al., „The Speed of Information in a ‘Fast-Light’ Optical Medium” („Az információ sebessége »gyors fény« optikai közegben”), *Nature* 425 (2003. október 16.): 695–98. o. Lásd még Raymond Y. Chiao et al., „Superluminal and Porelectric Effects in Rubidium Vapor and Ammonia Gas” („Szuperlumináris és paraelektromos hatások rubídiumgőzben és ammóniagázban”), *Quantum and Semiclassical Optics* 7 (1995): 279. o.

[\[636\]](#) I. Marcikic et al., „Long-Distance Teleportation of Qubits at Telecommunication Wavelengths” („Qubitek nagy távolságra történő teleportálása telekommunikációs hullámhosszokon”), *Nature* 421 (2003. január): 509–13. o.; John Roach, „Physicists Teleport Quantum Bits over Long Distance” („Fizikusok nagy távolságra teleportáltak kvantumbiteket”), *National Geographic News*, 2003. január 29.; Herb Brody, „Quantum Cryptography” („Kvantumrejtjelezés”) in „10 Emerging Technologies That Will Change the World” („Tíz fejlődő technológia, ami meg fogja változtatni a világot”), *MIT Technology Review*, 2003. február; N. Gisin et al., „Quantum Correlations with Moving Observers” („Kvantumkorrelációk mozgó megfigyelőkkel”), *Quantum Optics* (2003. december): 51. o.; Quantum Cryptography kiállítás, ITU Telecom World 2003, Genf, 2003. október 1.; Sora Song, „The Quantum Leaper” („A kvantumugró”), *Time*, 2004. március 15.; Mark Buchanan, „Light’s Spooky Connections Set New Distance Record” („A fény kísérteties kapcsolatai új távolsági rekordot állítottak fel”), *New Scientist*, 1997. június 28.

[\[637\]](#) Charles H. Lineweaver és Tamara M. Davis, „Misconceptions About the Big Bang” („Tévképzetek az ősrobbanásról”), *Scientific American*, 2005. március.

[\[638\]](#) A. Einstein és N. Rosen, „The Particle Problem in the General Theory of Relativity” („A részecskék problémája az általános relativitáselméletben”), *Physical Review* 48 (1935): 73. o.

[\[639\]](#) J. A. Wheeler, „Geons” („Geonok”), *Physical Review* 97 (1955): 511–36. o.

[\[640\]](#) M. S. Morris, K. S. Thorne és U. Yurtsever, „Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition” („Féregjáratok, időgépek és a gyenge energiafeltétel”), *Physical Review Letters* 61.13 (1988. szeptember 26.): 1446–49. o.; M. S. Morris és K. S. Thorne, „Wormholes in Spacetime and Their Use for Interstellar Travel: A Tool for Teaching General Relativity” („Féregjáratok a téridőben és felhasználásuk a csillagközi utazáshoz: eszköz az általános relativitás tanításához”), *American Journal of Physics* 56.5 (1988): 395–412. o.

[\[641\]](#) M. Visser, „Wormholes, Baby Universes, and Causality” („Féregjáratok, bébi univerzumok és kauzalitás”), *Physical Review D* 41.4 (1999. február 15.): 1116–24. o.

[\[642\]](#) Sandberg, „Physics of Information Processing Superobjects” („Az információfeldolgozó szuperobjektumok fizikája”).

[\[643\]](#) David Hochberg és Thomas W. Kephart, „Wormhole Cosmology and the Horizon Problem” („A féregjárat-kozmológia és a horizont-probléma”), *Physical Review Letters* 70 (1993): 2665–68. o., <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9211006>; D. Hochberg és M. Visser, „Geometric Structure of the Generic Static Transversable Wormhole Throat” („Az általános statikus átjárható féregjáratok geometriai struktúrája”), *Physical Review D* 56 (1997): 4745. o.

[\[644\]](#) J. K. Webb et al., „Further Evidence for Cosmological Evolution of the Fine Structure Constant” („További bizonyítékok a finomszerkezeti állandó kozmológiai evolúciójára”), *Physical Review Letters* 87.9 (2001. augusztus 27.): 091301.; „When Constants Are Not Constant” („Amikor az állandók nem állandók”), *Physics in Action* (2001. október), <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0012539>.

[\[645\]](#) Joao Magueijo, John D. Barrow és Haavard Bunes Sandvik, „Is It e or Is It c ? Experimental Tests of Varying Alpha” („e vagy c ? A változó alfa kísérleti ellenőrzése”), *Physical Letters B* 549 (2002): 284–89. o.

[\[646\]](#) John Smart, „Answering the Fermi Paradox: Exploring the Mechanisms of Universal Transcension” („Válasz a Fermi-paradoxonra: az univerzális transzcenzió mechanizmusainak feltárása”), <http://accelerating.org/articles/answeringfermiparadox.html>. Lásd még <http://singularitywatch.com> és Smart életrajzát ugyanott.

[\[647\]](#) James N. Gardner, *Biocosm: The New Scientific Theory of Evolution: Intelligent Life Is the Architect of the Universe* (Biokozmosz: az evolúció új tudományos elmélete: az intelligens élet a világegyetem építész), (Maui: Inner Ocean, 2003).

[\[648\]](#) Lee Smolin in „Smolin vs. Susskind: The Anthropic Principle” („Smolin vitája Susskinnel: az antropikus elv”), *Edge* 145, http://www.edge.org/3rd_culture/smolin_susskind04/smolin_susskind.html; Lee Smolin, „Scientific Alternatives to the Anthropic Principle” („Az antropikus elv tudományos alternatívái”), <http://arxiv.org/abs/hep-th/0407213>.

[\[649\]](#) Kurzweil, *Age of Spiritual Machines* (A spirituális gépek kora), 258–60. o.

[\[650\]](#) Gardner, *Biocosm* (Biokozmosz).

[\[651\]](#) S. W. Hawking, „Particle Creation by Black Holes” („Részecsketeremtő fekete lyukak”), *Communications in Mathematical Physics* 43 (1975): 199–220. o.

[\[652\]](#) Az eredeti fogadás megtalálható: http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/info_bet.html. Lásd még Peter Rodgers, „Hawking Loses Black Hole Bet” („Hawking elveszte a feketelyuk-fogadást”), *Physics World*, 2004. augusztus,

<http://physicsworld.com/cws/article/news/2004/jul/22/hawking-loses-black-hole-bet>.

{653} Ezekhez a becslésekhez Lloyd fogta az anyag megfigyelt sűrűségét – ami körülbelül egy hidrogénatom köbméterenként –, és kiszámította a világegyetem összenergiáját. Ezt a számot elosztotta a Planck-állandóval, és körülbelül 10^{90} számítás per másodpercet kapott. Seth Lloyd, „Ultimate Physical Limits to Computation” („A számítás végső fizikai korlátai”), *Nature* 406.6799 (2000. augusztus 31.): 1047–54. o. A 3. elektronikus változat dátuma 2000. február 14., elérhető <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9908043> (2000. augusztus 31.).

{654} Jacob D. Bekenstein, „Information in the Holographic Universe: Theoretical Results about Black Holes Suggest That the Universe Could Be Like a Gigantic Hologram” („Információ a holografikus világegyetemben: a fekete lyukakra vonatkozó elméleti eredmények arra utalnak, hogy a világegyetem talán olyan, mint egy gigantikus hologram”), *Scientific American* 289.2 (2003. augusztus): 58–65. o., <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=information-in-the-hologr-2003-08>.

{655} In Jay W. Richards et al., *Are We Spiritual Machines? Ray Kurzweil vs. the Critics of Strong A.I. (Spirituális gépek vagyunk? Ray Kurzweil az erős M. I. kritikusai ellen)* (Seattle: Discovery Institute, 2002), Bevezetés, <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0502.html>.

{656} Ray Kurzweil és Terry Grossman, M.D., *Fantastic Voyage: Live Long Enough to Live Forever* (Fantasztikus utazás: élj olyan sokáig, hogy örökké élj!) (New York: Rodale Books, 2004).

{657} Uo.

{658} Uo.

{659} Max More és Ray Kurzweil, „Max More and Ray Kurzweil on the Singularity” („Max More és Ray Kurzweil a szingularitásról”), 2002. február 26., <http://www.KurzweilAI.net/articles/art0408.html>.

{660} Uo.

{661} Uo.

{662} Arthur Miller, *After the Fall* (Bűnbeesés után) (New York: Viking, 1964).

{663} Egy, az Oxford Philosophical Society előtt 1959-ben felolvasott, majd „Minds, Machines and Gödel” („Elmék, gépek és Gödel”) címen kiadott tanulmányból. *Philosophy* 36 (1961): 112–27. o. Legelső utánnyomása megjelent in: Kenneth Sayre és Frederick Crosson, szerk., *The Modeling of Mind* (Az elme modellezése), (Notre Dame: University of Notre Dame Press, 1963), 255–71. o.

{664} Martine Rothblatt, „Biocyberethics: Should We Stop a Company from Unplugging an Intelligent Computer?” („Biokibernetika: meg kell-e akadályoznunk, hogy egy cég kikapcsoljon egy intelligens számítógépet?”), 2003. szeptember 28., <http://www.KurzweilAI.net/meme/frame.html?main=/articles/art0594.html> (benne linkekkel a webes közvetítésre és a leiratára).

{665} Jaron Lanier, „One Half of a Manifesto” („Egy kiáltvány fele”), *Edge*, http://www.edge.org/3rd_culture/lanier/lanier_index.html; lásd még Jaron Lanier, „One-Half of a Manifesto”, *Wired News*, 2000. december, <http://www.wired.com/wired/archive/8.12/lanier.html>.

{666} Uo.

{667} Norbert Wiener, *Cybernetics: or, Control and Communication in the Animal and the Machine* (Kibernetika: avagy kontroll és kommunikáció az állatokban és a gépekben) (Cambridge.: MIT Press, 1948).

{668} „How Do You Persist When Your Molecules Don't?” („Hogy maradunk meg, amikor a molekuláink elpusztulnak?”), *Science and Consciousness Review* 1.1 (2004. június), <http://www.sci-con.org/articles/20040601.html>.

{669} David J. Chalmers, „Facing Up to the Problem of Consciousness” („Szembenézés a tudatosság problémájával”), *Journal of Consciousness Studies* 2.3 (1995): 200–219. o., <http://consc.net/papers/facing.html>.

{670} Huston Smith, *The Sacred Unconscious* (A szent tudatalatti), videokazetta (The Wisdom Foundation, 2001), megvásárolható: <http://www.fonsvitae.com/sacredhuston.html>.

{671} Jerry A. Fodor, *RePresentations: Philosophical Essays on the Foundations of Cognitive Science* (RePrezentációk: filozófiai írások a kognitív tudomány alapjairól), (Cambridge: MIT Press, 1981).

{672} Bill McKibben, „How Much Is Enough? The Environmental Movement as a Pivot Point in Human History” („Mennyi az elég? A környezetvédő mozgalom mint az emberi történelem sarokpontja”), *Harvard Seminar on Environmental Values*, 2000. október 18.

{673} Az 1960-as években az amerikai kormány elvégzett egy kísérletet, amely során megkértek három akkor végzett fizikushallgatót, hogy csak nyilvánosan elérhető információk alapján építsenek egy nukleáris fegyvert. A három hallgató három év alatt megépített egyet (<http://www.pimall.com/nais/nl/n.nukes.html>). Az atombomba építéséhez szükséges információk mind fellelhetők az interneten, és egy állami laboratórium könyv formájában is kiadta őket. 2002-ben a brit Védelmi Minisztérium átadta a bombaépítéshez szükséges tervrajzokat és pontos utasításokat a Nemzeti Levéltárnak, ahonnan azóta eltávolították azokat

(<http://news.bbc.co.uk/1/hi/uk/1932702.stm>). A fenti linkek nem tartalmazzak atomfegyverek építéséhez szükséges terveket és utasításokat.

[674] „The John Stossel Special: You Can’t Say That!” („John Stossel különlegességei: Ezt nem mondhatja!”), ABC News, 2000. március 23.

[675] Az interneten rengeteg információ található bombák, fegyverek és robbanóanyagok készítéséről, köztük katonai kézikönyvek is. Az információk egy része téves, de az eltávolításukra irányuló erőfeszítések ellenére továbbra is elérhetők felhasználható ismeretek is ezekben a témákban. A Kongresszus 1997 júniusában elfogadott egy kiegészítést a Védelmi Minisztérium egyik költségvetési felhatalmazási törvényéhez (a Feinstein-kiegészítést, SP 419), ami megtiltotta a bombaépítéshez szükséges információk terjesztését. Lásd Anne Marie Helmenstine, „How to Build a Bomb” („Hogyan építsünk bombát”), 2003. február 10., <http://chemistry.about.com/library/weekly/aa021003a.htm>. A mérgező ipari vegyi anyagokról rengeteg információ található az interneten és a könyvtárakban, mint ahogy a baktériumok és vírusok tenyésztéséről, a számítógépes vírusok írásáról, számítógépek és hálózatok feltöréséről is. Nem közlök pontos példákat ezekről az információkról, mivel azzal destruktív egyéneket és csoportokat segíthetnék. Tudom, hogy az információk pusztán létezésük is magában hordozza ezt a veszélyt, de úgy érzem, a problémáról való nyílt beszéd előnyei túlsúlyban vannak a lehetséges káros következményekhez képest. Emellett az ilyen jellegű információ hozzáférhetőségét széles körben tárgyalta a média és a sajtó.

[676] Ray Kurzweil, *The Age of Intelligent Machines* (Az intelligens gépek kora), (Cambridge: MIT Press, 1990).

[677] Ken Alibek, *Biohazard* (Biohazard), (New York: Random House, 1999).

[678] Ray Kurzweil, *The Age of Spiritual Machines* (A spirituális gépek kora), (New York: Viking, 1999).

[679] Bill Joy, „Why the Future Doesn’t Need Us” („Miért nincs szüksége ránk a jövőnek”), *Wired*, 2000. április, <http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy.html>.

[680] A gén-splicingról (génátszabásról) szóló kézikönyvek (például A. J. Harwood, szerk. *Basic DNA and RNA Protocols* (Alapvető DNS- és RNS-protokollok), [Totowa: Humana Press, 1996] és a gén-splicinghoz szükséges reagensek és felszerelések bárhol beszerezhetők. Ha Nyugaton korlátoznák is ezeknek az anyagoknak a forgalmazását, számos orosz vállalat ki tudná szolgálni az igényeket.

[681] A „Sötét tél” szimuláció részletes összefoglalását lásd: „DARK WINTER: A Bioterrorism Exercise June 2001” („SÖTÉT TÉL: bioterrorista támadási gyakorlat, 2001. június”): http://www.biohazardnews.net/scen_smallpox.shtml. Rövid összefoglalás: <http://www.homelandsecurity.org/>.

[682] Richard Preston, „The Specter of a New and Deadlier Smallpox” („Egy új és halálosabb himlő kísértete”), *New York Times*, 2002. október 14., elérhető: <http://www.ph.ucla.edu/epi/bioter/specterdeadliersmallpox.html>.

[683] Alfred W. Crosby, *America’s Forgotten Pandemic: The Influenza of 1918* (Amerika elfeledett járványa: az 1918-as influenza), (New York: Cambridge University Press, 2003).

[684] „Power from Blood Could Lead to ‘Human Batteries’” („Vérsejtekből nyert energia »emberi akkumulátorokhoz« vezethet”), *Sydney Morning Herald*, 2003. augusztus 4., <http://www.smh.com.au/articles/2003/08/03/1059849278131.html>. Lásd ötödik fejezet, **[463]** jegyzet. Lásd még S. C. Barton, J. Gallaway és P. Atanassov, „Enzymatic Biofuel Cells for Implantable and Microscale Devices” („Enzimatiskus bioüzemanyag-cellák beültethető és mikroeszközökhöz”), *Chemical Reviews* 104.10 (2004. október): 4867–86. o.

[685] J. M. Hunt számításai szerint $1,55 \times 10^{19}$ kilogramm (10^{22} gramm) szén található szerves vegyületek alakjában. Ez alapján, azt feltételezve, hogy az összes „szerves szént” a biomassza tartalmazza (a biomassza fogalma nincs pontosan meghatározva, tehát konzervatívan tág értelemben használjuk), a következőképpen számíthatjuk ki a szénatomok hozzávetőleges számát:

A szén átlagos atomsúlya: (az izotópok miatt módosítva) = 12,011 gramm.

Szén a biomasszában = $1,55 \times 10^{22}$ gramm / 12,011 gramm = $1,3 \times 10^{21}$ mol.

$1,3 \times 10^{21} \times 6,02 \times 10^{23}$ (Avogadro-szám) = $7,8 \times 10^{44}$ szénatom.

J. M. Hunt, *Petroleum Geochemistry and Geology* (*Kőolaj-geokémia és -geológia*), (San Francisco: W. H. Freeman, 1979).

[686] Robert A. Freitas Jr., „The Gray Goo Problem” („A szürke massa probléma”), 2001. március 20., <http://www.kurzweilai.net/the-gray-goo-problem>.

[687] „Gray Goo Is a Small Issue” („A szürke kis probléma”), összefoglaló, Center for Responsible Nanotechnology, 2003. december 14., <http://crnano.org/BD-Goo.htm>; Chris Phoenix és Mike Treder, „Safe Utilization of Advanced Nanotechnology” („A fejlett nanotechnológia biztonságos alkalmazása”) Center for Responsible Nanotechnology, 2003. január, <http://crnano.org/safe.htm>; K. Eric Drexler, *Engines of Creation* (A teremtés motorjai), 11. fejezet, „Engines of Destruction” („A pusztítás motorjai”), (New York: Anchor Books, 1986), 171–90. o., http://www.foresight.org/EOC/EOC_Chaptec11.html; Robert A. Freitas Jr. és Ralph C. Merkle, *Kinematic Self-Replicating Machines* (Kinematikus önreplikáló gépek), 5.11. szakasz, „Replicators and Public Safety” („Replikátorok és közbiztonság”), (Georgetown: Landes Bioscience, 2004), 196–99. o., <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/5.11.htm> és section

6.3.1. szakasz, „Molecular Assemblers Are Too Dangerous” („A molekuláris összeszerelők túl veszélyesek”), 204–6. o., <http://www.MolecularAssembler.com/KSRM/6.3.1.htm>; Foresight Intézet, „Molecular Nanotechnology Guidelines: Draft Version 3.7” („Írányelvek a molekuláris nanotechnológiához: Vázlat, 3.7 változat”), 2000. június 4., <http://www.foresight.org/guidelines/>.

[688] Robert A. Freitas Jr., „Gray Goo Problem” („A szürke massa probléma”) és „Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators, with Public Policy Recommendations” („A biológiai anyaggal táplálkozó nanoreplikátorok globális ökofáigiájának bizonyos korlátai, intézkedési javaslatokkal”), Zyvex előzetes kiadás, 2000. április, 8.4. szakasz, „Malicious Ecophagy” („Rosszindulatú ökofágia”), és 6.0. szakasz, „Ecophagic Thermal Pollution Limits (ETPL)” („Az ökofág hőszennyezés korlátai”), <http://www.foresight.org/NanoRev/Ecophagy.html>.

[689] Nick D. Bostrom, „Existential Risks: Analyzing Human Extinction Scenarios and Related Hazards” („Egzisztenciális kockázatok: az emberi kihalás forgatókönyveinek és a kapcsolódó veszélyeknek az elemzése”), 2001. május 29., <http://www.kurzweilai.net/existential-risks-analyzing-human-extinction-scenarios-and-related-hazards>.

[690] Robert Kennedy, 13 Days (13 nap), (London: Macmillan, 1968), 110. o.

[691] H. Putnam, „The Place of Facts in a World of Values” („A tények helye az értékek világában”), in D. Huff és O. Prewitt, szerk., The Nature of the Physical Universe (A fizikai világegyetem természete), (New York: John Wiley, 1979), 114. o.

[692] Graham Allison, Nuclear Terrorism (Nukleáris terrorizmus), (New York: Times Books, 2004).

[693] Martin I. Meltzer, „Multiple Contact Dates and SARS Incubation Periods” („Többszörös kontaktus dátumok és a SARS lappangási ideje”), Emerging Infectious Diseases 10.2 (2004. február), <http://www.cdc.gov/ncidod/EID/vol10no2/03-0426-G1.htm>.

[694] Robert A. Freitas Jr., „Microbivores: Artificial Mechanical Phagocytes Using Digest and Discharge Protocol” („Mikrobivorok: emésztő- és ürítőprotokollt alkalmazó mesterséges mechanikus fagociták”), Zyvex előzetes megjelenés, 2001. március, <http://www.rfreitas.com/Nano/Microbivores.htm>, és „Microbivores: Artificial Mechanical Phagocytes” („Mikrobivorok: mesterséges mechanikus fagociták”), Foresight Update no. 44, 2001. március 31., 11–13. o., <http://www.imm.org/Reports/Rep025.html>.

[695] Max More, „The Proactionary Principle” („A proaktív elv”), 2004. május, <http://www.maxmore.com/proactionary.htm> és <http://www.extropy.org/proactionaryprinciple.htm>. More a következőképpen foglalja össze a proaktív elvet:

1. Az ember azon szabadsága, hogy technológiai fejlesztést végezzen, az emberiség számára értékes dolog. Ezért a bizonyítás terhe azokra hárul, akik korlátozó intézkedéseket szorgalmaznak. Minden javasolt intézkedést alaposan meg kell vizsgálni.

2. A kockázatokat a tudományos ismeretek fényében értékeljük, ne a közfelfogás szerint, és számítsunk a szokásos egyoldalú érvelésre.

3. A hipotetikus kockázatokkal szemben részesítsük előnyben az emberi egészségre és a környezetre leselkedő ismert és bizonyított veszélyek enyhítését.

4. A technológiai kockázatokat ugyanúgy kezeljük, mint a természetieket; kerüljük a természeti kockázatok alulbecsülését és az emberi technológiai kockázatok felnagyítását. Részletesen ismertetjük a technológiai fejlődés előnyös hatásait.

5. Mérlegeljük a technológia elvetésével együtt járó elvesztett lehetőségeket, és vegyük számításba a lehetséges pótlásával együtt járó költségeket és kockázatokat, alaposan megfontolva a széles körben érvényesülő és a hosszú távú hatásokat.

6. Korlátozó intézkedéseket csak akkor fontoljunk meg, ha a tevékenység potenciális hatásának a valószínűsége és a súlyossága is jelentős. Ezekben az esetekben, ha a tevékenység előnyökkel is jár, a nemkívánatos hatásokhoz való alkalmazkodás kivitelezhetőségének fényében mérlegeljük a hatásokat. Ha a technológiai fejlődést korlátozó intézkedés jogosnak tűnik, gondoskodjunk róla, hogy az intézkedések mértéke arányos a valószínűsíthető hatásokkal.

7. Amikor választunk a technológiai újítást korlátozó intézkedések között, a következőképpen állítsuk sorrendbe a döntési kritériumokat: biztosítsunk prioritást az emberi és egyéb intelligens életnek a más fajok számára jelentette veszélyekkel szemben; az emberi egészséget fenyegető nem halálos veszélyeknek a környezetre korlátozódó veszélyekkel szemben (ésszerű határok között); a közvetlen veszélyeknek a távoliakkal szemben; azt az intézkedést válasszuk, amely várhatólag a biztosabb veszélyeknek biztosít prioritást a kevésbé biztosabbakkal szemben, illetve a visszafordíthatatlan vagy maradandó hatásoknak az átmeneti hatásokkal szemben.

[696] Martin Rees, Our Final Hour: A Scientist's Warning: How Terror, Error, and Environmental Disaster Threaten Humankind's Future in This Century – on Earth and Beyond (Az utolsó óráink: egy tudós figyelemfelhívó gondolatai az emberiség jövőjét ebben a században fenyegető terrorra, hibákra és környezeti katasztrófákra vonatkozóan – a Földön és azon túl), (New York: Basic Books, 2003).

[697] Scott Shane, Dismantling Utopia: How Information Ended the Soviet Union (Utópia lerombolása: hogyan végzett az információ a Szovjetunióval), (Chicago: Ivan R. Dee, 1994); lásd még James A. Dorn ismertetőjét: www.cato.org/pubs/journal/cj16n2/cj16n2-7.pdf.

[698] Lásd George DeWan, „Diary of a Colonial Housewife” („Egy gyarmati háziasszony naplója”), Newsday, 2005, mint beszámolót az emberi élet nehézségéről kétszáz évvel ezelőtt.

[699] Jim Oeppen és James W. Vaupel, „Broken Limits to Life Expectancy” („A várható élettartam határainak áttörése”), Science

[\[700\]](#) Steve Bowman és Helit Barel, Weapons of Mass Destruction: The Terrorist Threat (Tömegpusztító fegyverek: a terrorista fenyegetés), Congressional Research Service Report for Congress, 1999. december 8., <http://www.cnire.org/nle/crsreports/international/inter-75.pdf>.

[\[701\]](#) Eliezer S. Yudkowsky, „Creating Friendly AI 1.0, The Analysis and Design of Benevolent Goal Architectures” („A barátságos MI 1.0-s változatának létrehozása, a jóindulatú célarchitektúrák elemzése és tervezése), 2001, The Singularity Institute, <http://www.singinst.org/CFAI/>; Eliezer S. Yudkowsky, „What Is Friendly AI?” („Mi a barátságos MI?”), 2001. május 3., <http://www.kurzweilai.net/eliezer-s-yudkowsky>.

[\[702\]](#) Ted Kaczynski, „The Unabomber’s Manifesto” („Unabomber kiáltványa”), 2001. május 14., <http://www.kurzweilai.net/the-unabomber-s-manifesto>.

[\[703\]](#) Bill McKibben, Enough: Staying Human in an Engineered Age (Elég: embernek maradni a gépesített korban), (New York: Times Books, 2003).

[\[704\]](#) Kaczynski, „The Unabomber’s Manifesto” („Unabomber kiáltványa”).

[\[705\]](#) Foresight Intézet IMM, „Foresight Guidelines on Molecular Nanotechnology” („A Foresight molekuláris nanotechnológiai irányelvei”), 1999. február 21., <http://www.foresight.org/guidelines/current.html>; Christine Peterson, „Molecular Manufacturing: Societal Implications of Advanced Nanotechnology” („Molekuláris gyártás: a fejlett nanotechnológia társadalmi hatása”), 2003. április 9., <http://www.kurzweilai.net/molecular-manufacturing-societal-implications-of-advanced-nanotechnology>; Chris Phoenix és Mike Treder, „Safe Utilization of Advanced Nanotechnology” („A fejlett nanotechnológia biztonságos alkalmazása”), 2003. január 28., <http://www.kurzweilai.net/safe-utilization-of-advanced-nanotechnology>; Robert A. Freitas Jr., „The Gray Goo Problem” („A szürke massa probléma”), KurzweilAI.net, 2002. március 20., <http://www.kurzweilai.net/the-gray-goo-problem>.

[\[706\]](#) Robert A. Freitas Jr., magánlevelezés Ray Kurzweillel, 2005. január. Freitas részletesen leírja a javaslatát in Robert A. Freitas Jr., „Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators, with Public Policy Recommendations” („A biológiai anyaggal táplálkozó nanoreplikátorok globális ökofáigiájának bizonyos korlátai, intézkedési javaslatokkal”).

[\[707\]](#) Ralph C. Merkle, „Self Replicating Systems and Low Cost Manufacturing” („Önreplikáló rendszerek és alacsony költségű gyártás), 1994, <http://www.zyvex.com/nanotech/selfRepNATO.html>.

[\[708\]](#) Neil King Jr. és Ted Bridis, „FBI System Covertly Searches E-mail” („Az FBI rendszere titokban átfésüli az e-maileket”), Wall Street Journal Online (2000. július 10.), <http://online.wsj.com/article/SB963264584706292829.html>.

[\[709\]](#) Patrick Moore, „The Battle for Biotech Progress – GM Crops Are Good for the Environment and Human Welfare” („Harc a biotech haladásáért – a GM-növények előnyösek a környezet és az emberi jólét szempontjából”), Greenspirit (2004. február), <http://www.greenspirit.com/logbook.cfm?msid=62>.

[\[710\]](#) „GMOs: Are There Any Risks?” („GMO-k: léteznek kockázatok?”), European Commission (2001. október 9.), http://ec.europa.eu/research/biosociety/pdf/gmo_press_release.pdf.

[\[711\]](#) Rory Carroll, „Zambians Starve As Food Aid Lies Rejected” („A zambiaiak éheznek, miközben visszautasítják az élelmiszersegélyeket”), Guardian (2002. október 17.), <http://www.guardian.co.uk/gmdebate/Story/0,2763,813220,00.html>.

[\[712\]](#) Larry Thompson, „Human Gene Therapy: Harsh Lessons, High Hopes” („Emberi génterápia: kemény leckék, nagy remények”), FDA Consumer Magazine (2000. szeptember–október).

[\[713\]](#) Bill Joy, „Why the Future Doesn’t Need Us” („Miért nincs szüksége ránk a jövőnek?”).

[\[714\]](#) A Foresight irányelvei (Foresight Intézet, 4.0-s változat, 2004. október, <http://www.foresight.org/guidelines/current.html>) szándékaik szerint kitérnek a nanotechnológia lehetséges pozitív és negatív következményeire is. Tájékoztatásul kívánnak szolgálni a polgárok, a vállalatok és a kormányok számára, és konkrét irányelveket kívánnak adni a nanotechnológiai alapú molekuláris gyártás felelősségteljes kifejlesztéséhez. A Foresight irányelveit eredetileg az Institute Workshop on Molecular Nanotechnology Research Policy Guidelines alakította ki, az intézet és az Institute for Molecular Manufacturing (IMM) támogatásával, 1999. február 19–21. között. A résztvevők között volt James Bennett, Greg Burch, K. Eric Drexler, Neil Jacobstein, Tanya Jones, Ralph Merkle, Mark Miller, Ed Niehaus, Pat Parker, Christine Peterson, Glenn Reynolds és Philippe Van Nederveelde. Az irányelveket azóta többször frissítették.

[\[715\]](#) Martine Rothblatt, a United Therapeutics igazgatója azt javasolta, hogy moratórium helyett olyan szabályozást alkossanak, amely szerint egy új Nemzetközi Xenotranszplantációs Hatóság felügyelné és hagyná jóvá a kórokozóktól mentes, genetikailag módosított sertéseket, mint a xenograftok elfogadható forrását. Rothblatt megoldása segít kiszorítani szakadár sebészeket azzal, hogy minden egyes csatlakozó, a szabályozást a határain belül betartató országnak azt ígéri, hogy ingyen részesül xenograftokból a szervátültetésre szoruló polgárai számára. Lásd Martine Rothblatt, „Your Life or Mine: Using Geoethics to Resolve the Conflict Between Public and Private Interests” („A te életed vagy az enyém: a geoetika felhasználása a köz- és a magánérdek közötti konfliktus megoldására”), in Xenotransplantation (Xenotranszplantáció), (Burlington: Ashgate, 2004). Nyilatkozat: A United Therapeutics igazgatótanácsának a tagja

vagyok.

{716} Lásd Singularity Institute, <http://www.singinst.org>. Lásd még a {701} jegyzetet fentebb. Yudkowsky azért hozta létre Singularity Institute for Artificial Intelligence (SIAI)-t, hogy kifejlessze a „barátságos MI-t”, és „jóindulatot eredményező kognitív tartalmat, terveket és kognitív architektúrákat hozzon létre”, mielőtt lehetségessé válik az embert közelítő vagy az embert felülmúló MI. A SIAI kialakította a SIAI irányelveit a barátságos MI-ről: „Friendly AI” („Barátságos MI”), <http://www.singinst.org/friendly/>. Ben Goertzel és az Artificial General Intelligence Research Institute szintén megvizsgálta a barátságos MI kifejlesztésével kapcsolatos problémákat; jelenleg a Novamente MI-motor kifejlesztésére koncentrál, ami tanulási algoritmusok és architektúrák összessége. Peter Voss, az Adaptive A.I., Inc. alapítója szintén részt vett a barátságos MI-ről szóló vitákban: <http://adaptiveai.com/>.

{717} Integrated Fuel Cell Technologies. Nyilatkozat: A szerző az IFCT egyik első befektetője és tanácsadója.

{718} New York Times, 2003. szeptember 23., vezércikk.

{719} Az Egyesült Államok Képviselőháza tudományos bizottsága meghallgatást tartott 2003. április 9-én „a nanotechnológia és a H. R. 766, a 2002-es nanotechnológiai kutatási és fejlesztési törvény társadalmi hatásairól”. Lásd „Full Science Committee Hearing on the Societal Implications of Nanotechnology” („Teljes tudományos bizottsági meghallgatás a nanotechnológia társadalmi hatásairól”), <http://www.house.gov/>, és „Hearing Transcript” („A meghallgatás átírata”), http://commdocs.house.gov/committees/science/hsy86340.000/hsy86340_0f.htm. Ray Kurzweil beszámolóját lásd <http://www.kurzweilai.net/testimony-of-ray-kurzweil-on-the-societal-implications-of-nanotechnology>. Lásd még Amara D. Angelica, „Congressional Hearing Addresses Public Concerns About Nanotech” („A kongresszusi meghallgatás a közvélemény nanotechnológiával kapcsolatos aggodalmaival foglalkozik”), 2003. április 14., <http://www.kurzweilai.net/congressional-hearing-addresses-public-concerns-about-nanotech>.

{720} Michael Denton, „Organism and Machine” („Organizmus és gép”), in Jay W. Richards et al., *Are We Spiritual Machines? Ray Kurzweil vs. the Critics of Strong A.I. (Spirituális gépek vagyunk? Ray Kurzweil és az erős MI kritikusai)*, (Seattle: Discovery Institute Press, 2002), <http://www.kurzweilai.net/are-we-spiritual-machines-ray-kurzweil-critics-strong-ai>.

{721} Jaron Lanier, „One Half of a Manifesto” („Egy kiáltvány fele”), *Edge* (2000. szeptember 25.), <http://www.edge.org/documents/archive/edge74.html>.

{722} Uo.

{723} Az ötödik és hatodik fejezetekben találhatunk példákat arra, hogy a szűken értelmezett MI mélyen beágyazódott a modern infrastruktúrába.

{724} Lanier, „One Half of a Manifesto” („Egy kiáltvány fele”).

{725} Például a Kurzweil Voice, amit eredetileg a Kurzweil Applied Intelligence fejlesztett ki.

{726} Alan G. Ganek, „The Dawning of the Autonomic Computing Era” („Az autonóm számítástechnika korának hajnala”), *IBM Systems Journal* (2003. március), <http://www.cs.unm.edu/~darnold/classes/cs591-f12/papers/Ganek03Dawning.pdf>.

{727} Arthur H. Watson és Thomas J. McCabe, „Structured Testing: A Testing Methodology Using the Cyclomatic Complexity Metric” („Strukturált tesztelés: egy tesztelési módszertan a ciklomatikus komplexitásmérés felhasználásával”), NIST-különkiadvány, 500–35. o., Computer Systems Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 1996.

{728} Mark A. Richards és Gary A. Shaw, „Chips, Architectures and Algorithms: Reflections on the Exponential Growth of Digital Signal Processing Capability” („Chipek, architektúrák és algoritmusok: elmélkedések a digitális jelfeldolgozás kapacitásának exponenciális növekedéséről”), *IEEE Signal Processing*, 2004. december.

{729} Jon Bentley, „Programming Pearls” („Programozási gyöngyszemek”), *Communications of the ACM* 27.11 (November 1984): 1087–92. o.

{730} C. Eldering, M. L. Sylla és J. A. Eisenach, „Is There a Moore’s Law for Bandwidth” („A sávszélességnek van Moore törvénye?”), *IEEE Communications* (1999. október): 117–21. o.

{731} J. W. Cooley és J. W. Tukey, „An Algorithm for the Machine Computation of Complex Fourier Series” („Komplex Fourier-sorok gépi kiszámításának algoritmusai”), *Mathematics of Computation* 19 (1965. április): 297–301. o.

{732} Körülbelül 100 milliárd neuron van, egyenként körülbelül 1000 „kiágzó” kapcsolattal, tehát körülbelül 100 billió (10^{14}) kapcsolat létezik. Minden kapcsolat esetében legalább 70 bit kell a kapcsolat két végén lévő két neuron azonosítójának tárolásához. Ez hozzávetőlegesen 10^{16} bit. Még a tömörítetlen genom is körülbelül 6 milliárd bit (kb. 10^{10}), az arány tehát legalább 10^6 :1. Lásd negyedik fejezet.

{733} Robert A. Freitas Jr., *Nanomedicine (Nanogyógyászat, I. kötet, Basic Capabilities (Alapvető képességek))*, 6.3.4.2. szakasz, „Biological Chemomechanical Power Conversion” („Biológiai kemomechanikus energiaátalakítás”), (Georgetown: Landes Bioscience, 1999), 147–48. o., <http://www.nanomedicine.com/NMI/6.3.4.2.htm#p4>; lásd az illusztrációt a <http://www.nanomedicine.com/NMI/Figures/6.2.jpg> címen.

{734} Richard Dawkins, „Why Don't Animals Have Wheels?” („Miért nincs az állatoknak kerekük?”), *Sunday Times*, 1996. november 24.

{735} Thomas Ray, „Kurzweil's Turing Fallacy” („Kurzweil Turing-téveszméje”), in Richards et al., *Are We Spiritual Machines?* (*Spirituális gépek vagyunk?*).

{736} Uo.

{737} Anthony J. Bell, „Levels and Loops: The Future of Artificial Intelligence and Neuroscience” („Szintek és hurkok: a mesterséges intelligencia és az idegtudomány jövője”), *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 354 (1999): 2013–20. o., <http://www.cnl.salk.edu/~tony/ptrsl.pdf>.

{738} Uo.

{739} David Dewey, „Introduction to the Mandelbrot Set” („Bevezetés a Mandelbrot-halmazba”), <http://www.ddewey.net/mandelbrot>.

{740} Christof Kochot idézi John Horgan, *The End of Science (A tudomány vége)*, (Reading: Addison-Wesley, 1996).

{741} Roger Penrose, *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness (Az elme árnyékai: a hiányzó tudattudomány keresése)*, (New York: Oxford University Press, 1996); Stuart Hameroff és Roger Penrose, „Orchestrated Objective Reduction of Quantum Coherence in Brain Microtubules: The ‘Orch OR’ Model for Consciousness” („A kvantumkoherencia összehangolt objektív redukciója agyi mikrotubulusokban: a tudat »Orch OR« modellje”), *Mathematics and Computer Simulation* 40 (1996): 453–80. o., <http://www.quantumconsciousness.org/penrose-hameroff/orchor.html>.

{742} Sander Olson, „Interview with Seth Lloyd” („Interjú Seth Lloydal”), 2002. november 17.

{743} Bell, „Levels and Loops” („Szintek és hurkok”).

{744} Lásd a számítási kapacitás exponenciális növekedésének ábráját a második fejezetben.

{745} Alfred N. Whitehead és Bertrand Russell, *Principia Mathematica*, 3 kötet. (Cambridge: Cambridge University Press, 1910, 1912, 1913).

{746} Gödel nemteljességi tétele először az „Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I” című cikkében jelent meg, in *Monatshefte für Mathematik und Physik* 38 (1931): 173–98. o.

{747} Alan M. Turing, „On Computable Numbers with an Application to the Entscheidungsproblem” („A kiszámítható számoknak az eldönthetőségi problémára való alkalmazhatóságáról”), *Proceedings of the London Mathematical Society* 42 (1936): 230–65. o. Az eldönthetőségi vagy megállási problémáról van szó („Entscheidungsproblem”) – hogyan határozzuk meg előre, hogy egy algoritmus meg fog-e állni (döntésre jut), vagy végtelen ciklusban tovább folytatódik.

{748} Church változata megjelent in Alonzo Church, „An Unsolvability Problem of Elementary Number Theory” („Az elemi számelmélet egy megoldhatatlan problémája”), *American Journal of Mathematics* 58 (1936): 345–63. o.

{749} A Church–Turing-teszt bizonyos implikációinak szórakoztató bemutatását illetően lásd Douglas R. Hofstadter, *Gödel, Escher, Bach: Egybefont gondolatok birodalma*. (Budapest, Typotex, 1999).

{750} A szorgoshód-probléma példa a kiszámíthatatlan függvények nagy kategóriájára, ahogyan azt Radó Tibornál láthatjuk, in: „On Noncomputable Functions” („A kiszámíthatatlan függvényekről”), *Bell System Technical Journal* 41.3 (1962): 877–84. o.

{751} Ray, „Kurzweil's Turing Fallacy” („Kurzweil Turing-téveszméje”).

{752} Lanier, „One Half of a Manifesto” („Egy kiáltvány fele”).

{753} Egy ember, aki nem alszik, nincs kómában és kellően fejlett (azaz nem agy nélküli magzat), szükségképpen tudatos.

{754} John R. Searle, „I Married a Computer” („Hozzámentem egy számítógéphez”), in Richards et al., *Are We Spiritual Machines?* (*Spirituális gépek vagyunk?*).

{755} John R. Searle, *The Rediscovery of the Mind (Az elme újrafelfedezése)*, (Cambridge: MIT Press, 1992).

{756} Hans Moravec, *Letter to the Editor; (Levél a szerkesztőhöz)*, New York Review of Books, <http://www.kurzweilai.net/letter-from-hans-moravec>.

{757} John Searle Ray Kurzweilnek, 1998. december 15.

{758} Lanier, „One Half of a Manifesto” („Egy kiáltvány fele”).

{759} David Brooks, „Good News About Poverty” („Jó hír a szegénységről”), *New York Times*, 2004. november 27. A35. o.

{760} Hans Moravec, *Letter to the Editor; (Levél a szerkesztőhöz)*, New York Review of Books, <http://www.kurzweilai.net/letter-from-hans-moravec>.

[\[761\]](#) Patrick Moore, „The Battle for Biotech Progress – GM Crops Are Good for the Environment and Human Welfare” („Harc a biotech haladásáért – a GM-növények előnyösek a környezet és az emberi jólét szempontjából”), *Greenspirit* (2004. február), <http://www.greenspirit.com/logbook.cfm?msid=62>.

[\[762\]](#) Joel Cutcher-Gershenfeld, magánkommunikáció Ray Kurzweillel, 2005. február.

[\[763\]](#) William A. Dembski, „Kurzweil’s Impoverished Spirituality” („Kurzweil lebutított spiritualitása”), in Richards et al., *Are We Spiritual Machines? (Spirituális gépek vagyunk?)*.

[\[764\]](#) Denton, „Organism and Machine” („Organizmus és gép”).

[\[765\]](#) Ahogyan idézi James Gardner, „Selfish Biocosm” („Önző biokozmosz”), *Complexity* 5.3 (2000. január–február): 34–45. o.

[\[766\]](#) A $z \cdot y = 1/x$ függvénynél az $x = 0$ pontban a függvény szó szerint meghatározatlan, viszont megmutatható, hogy ennek környezetében y értéke meghalad minden véges értéket. Az $y = 1/x$ -t rendezhetjük a következőképpen: $x = 1/y$. Ha tehát y -nak egy nagy, de véges számértéket adunk, akkor x nagyon kicsi lesz, de nem nulla, akármilyen nagy is az y . Így látjuk, hogy az $y = 1/x$ -ben y értéke meghalad minden véges számot, ahogy $x = 0$ felé közeledünk. Más szóval y -ra tetszőleges véges értéket kaphatunk.

[\[767\]](#) Az emberi agy funkcionális szimulálásához szükséges 10^{16} számítás per másodperc számítási kapacitással (lásd harmadik fejezet) és körülbelül 10^{10} (tízmilliárdnál kevesebb) emberi aggyal számolva, 10^{26} számítás per másodperc szükséges az összes emberi agy szimulálásához. A 10^{90} számítás per másodperc 10^{64} -szer ennyi. Ha a konzervatívabb 10^{19} számítás per másodperccel számolunk, ami becslésem szerint szükséges az összes neuronkomponens (dendrit, axon és a többi) összes nem-linearitásának a szimulálásához, akkor az arány $10^{61} \cdot 10^{60}$ egyenlő billiószor billiószor billiószor billiószor billió.

[\[768\]](#) Lásd az előző jegyzet becsléseit; a 10^{42} számítás per másodperc ennek a tízbilliárdszorosa (10^{16}).

[\[769\]](#) Stephen Jay Gould, „Jove’s Thunderbolts” („Jupiter villámai”), *Natural History* 103.10 (1994. október): 6–12. o.; 13. fejezet, in *Dinosaur in a Haystack: Reflections in Natural History* (Dinoszaurusz a szénakazalban: elmélkedések a természet történetéről), (New York: Harmony Books, 1995).

Tartalomjegyzék

[Impresszum](#)

[Köszönetnyilvánítás](#)

[Előszó Az eszmék ereje](#)

[Első fejezet A hat korszak](#)

[Az intuitív lineáris nézet, szemben a történelmi exponenciális nézettel](#)

[A hat korszak](#)

[A szingularitás küszöbén](#)

[Második fejezet A technológia evolúciójának elmélete: a gyorsuló megtérülések törvénye](#)

[A technológia életciklusának S-görbéje](#)

[A technológia életciklusa](#)

[A kecskebörtől a letöltésig](#)

[Moore törvénye, és ami azon túl van](#)

[Moore törvénye: önbeteljesítő jóslat?](#)

[Az ötödik paradigma](#)

[Fraktáldimenziók és az agy](#)

[DNS-szekvenálás, emlékezet, kommunikáció, az internet és a miniatürizálás](#)

[Információ, rend és evolúció: Wolfram és Fredkin
sejtautomatáinak tanulságai](#)

[Kifejleszhető a mesterséges intelligencia
egyszerű szabályok alapján?](#)

[A szingularitás mint gazdasági imperatívusz](#)

[Szerezzen nyolcvanbillió dollárt - záros határidőn
belül!](#)

[A defláció... rossz?](#)

[Harmadik fejezet Az emberi agy számítási képességeinek kihasználása](#)

[A számítástechnológia hatodik paradigmája:](#)

[a háromdimenziós molekuláris számítás, és az ebből kinövő számítástechnika](#)

[Az emberi agy számítási teljesítménye](#)

[A számítógép-használat korlátai](#)

[Negyedik fejezet Az emberi intelligencia szoftverének megvalósítása: hogyan fejtsük vissza az
emberi agyat?](#)

[Az agy visszafejtése: a feladat áttekintése](#)

[Más-e az emberi agy, mint egy számítógép?](#)

[Próbáljuk megérteni saját gondolkodásunkat A
kutatások gyorsuló üteme](#)

[Bepillantás az agyba](#)

[Az agy modellezése](#)

[Szubneurális modellek: szinapszisok és
dendrittüskék](#)

Neuronmodellek

Az agy rugalmassága

Az agyterületek modellezése

A neuromorf modell: a kisagy

Egy másik példa: a hallásért felelős területek

Watts-féle modellje

A látórendszer

Egyéb folyamatban lévő munkák: mesterséges
hippokampusz és mesterséges olivocerebelláris
pálya

A magasabb szintű funkciók megértése: utánzás,
előrejelzés és érzelmek

Az agy és a gépek összekapcsolása

Az agy egyre gyorsuló ütemű visszafejtése

Az emberi agy feltöltése

Ötödik fejezet GNR: Három, egymást átfedő forradalom

Genetika: az információ és a biológia metszete

Az élet számítógépe

Tervezett egészségmegőrzés

Degeneratív betegségek visszafordítása

Az öregedés visszafordítása

Emberi klónozás: a klóntechnológia legkevésbé érdekes alkalmazása

Nanotechnológia: az információ és a fizikai világ keresztmetszete

A biológiai összeállító

A vastag és a ragadós ujjak

A vita fokozódik

Korai alkalmazások

A szingularitás szolgálatában

A nanotechnológia környezeti alkalmazása

Nanobotok a vérkeringésben

Robotika: erős mesterséges intelligencia

A mesterséges intelligencia tele

A mesterséges intelligencia eszköztára

A gyenge MI használatának példái

Erős mesterséges intelligencia

Hatodik fejezet A hatások...

...az emberi testre

...az emberi agyra

...az emberi élettartamra

Átalakulás nem biológiai tapasztalóvá

Az információ élettartama

...a hadviselésre: a távirányítású, robotikus, robusztus, miniaturizált,
virtuálisvalóság- környezettel segített eszközök paradigmája

...a tanulásra

...a munkára

[...a játékra](#)

[...a kozmosz intelligens sorsára: miért vagyunk valószínűleg egyedül a világegyetemben](#)

[Hetedik fejezet Ich bin ein Singularitarian](#)

[A tudat nyugtalanító kérdése](#)

[Ki vagyok? Mi vagyok?](#)

[A szingularitás mint transzcendencia](#)

[Nyolcadik fejezet A GNR mélyen összefonódó lehetősége és veszélye](#)

[Összefonódó előnyök...](#)

[...és veszélyek](#)

[Az egzisztenciális kockázatok](#)

[A védelem előkészítése](#)

[A lemondás eszméje](#)

[A védelmi technikák kidolgozása és a szabályozás hatása](#)

[A GNR-védelem programja](#)

[Kilencedik fejezet Válasz a kritikákra](#)

[A kritikák köre](#)

[A hitetlenségből fakadó kritikák](#)

[A Malthus-kritika](#)

[A szoftveres kritika](#)

[Az analóg feldolgozás kritikája](#)

[Az idegi feldolgozás komplexitásának kritikája](#)

[A mikrotubulusok és a kvantumszámítás kritikája](#)

[A Church-Turing-tézis kritikája](#)

[A hibaszázalék kritikája](#)

[A „kötöttség” kritikája](#)

[Az ontológiai kritika: rendelkezhet-e egy számítógép tudattal?](#)

[A gazdag-szegény választóvonal kritikája](#)

[Az állami szabályozás valószínűségének kritikája](#)

[A teista kritika](#)

[A holista kritika](#)

[Utószó](#)

[Források és kapcsolat](#)

[Függelék Még egy pillantás a gyorsuló megtérülések törvényére](#)

[A szerzőről](#)

[Szerkesztői levél](#)

[Az Ad Astra Kiadó e-könyvei](#)

[Jegyzetek](#)