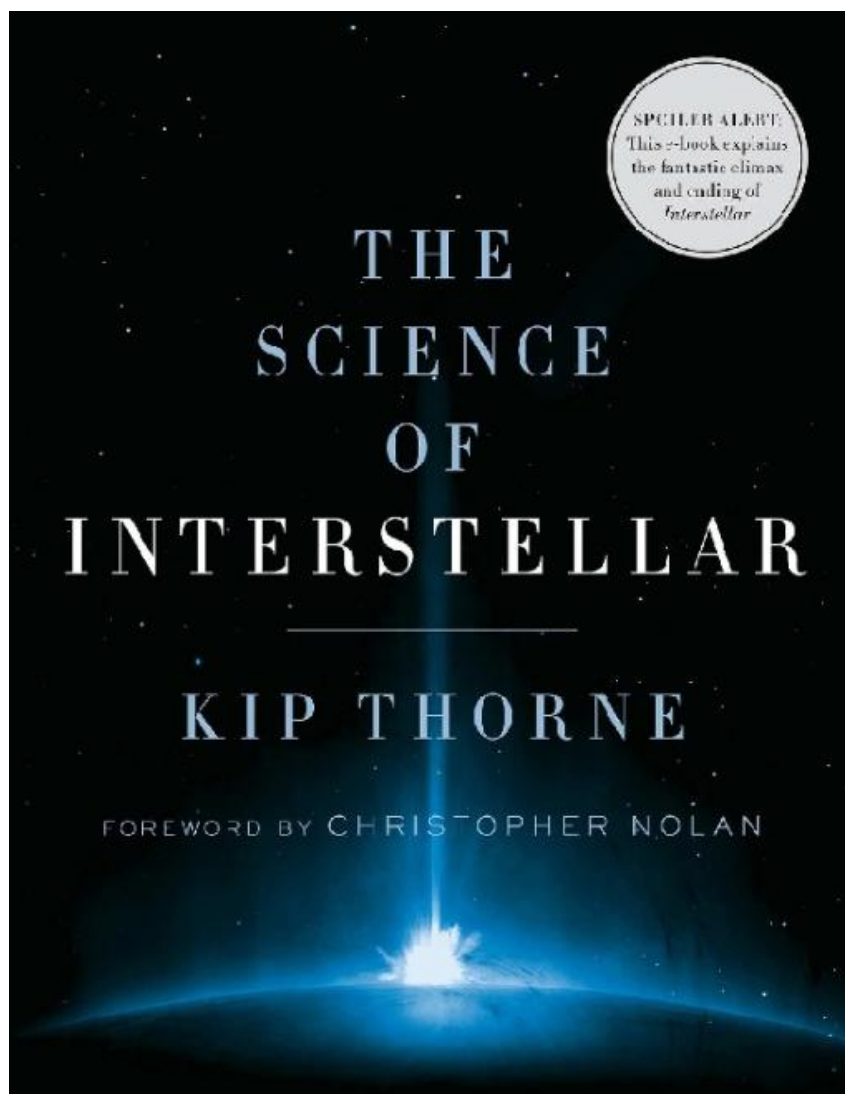


KIP THORNE

AZ INTERSTELLAR ÉS A TUDOMÁNY



ELŐSZÓ

A *Csillagok között* című film munkálatainak egyik legnagyobb élménye számomra, hogy megismerhettem Kip Thorne-t. A fizika iránti ragályos lelkesedése már első beszélgetésünkön nyilvánvaló volt, mint ahogyan a félmegoldásokkal szembeni idegenkedése is. Hozzáállása az összes általam felvetett történetmesélési kihíváshoz nyugodt, csendes és mindenekelőtt *tudományos* volt. Igyekezetében, hogy a hitelesség útján tartson, soha nem volt türelmetlen, még akkor sem, amikor vonakodtam elfogadni bizonyos alapigazságokat (bár kéthetes ellenszegülésem a „gyorsabb a fénynél” tilalmának egy halk sóhajt talán kiváltott).

Szerepét egyáltalán nem tudományos felügyelőként fogta fel, inkább szerzőtárs volt, aki szakfolyóiratok cikkeit fésülte át, hogy megoldást találjon azokra a csapdákra, amelyekbe írás közben beleevickéltem. Kip megtanított a tudomány alapvető jellemzőjére, a természet meglepetéseivel szembeni alázatra. Ez a hozzáállás lehetővé tette számára, hogy éljen a lehetőséggel, amit a fikció nyújt a paradox és az ismeretlen más szemszögből történő vizsgálatában - történetet meséljen. A könyv ékesen demonstrálja Kip élénk fantáziáját és szinte megszállott igyekezetét, hogy a tudományt azok számára is érthetővé tegye, akik nem rendelkeznek az ő óriási intellektusával és mérhetetlen tudásával. Célja, hogy az emberek megértsék univerzumunk őrült igazságait, és lázba jöjjenek tőlük. A könyv felépítése biztosítja, hogy az olvasó annyira merüljön el egy-egy témában, amennyire a tudása képessé teszi - senki nem fog lemaradni: mindenki részese lehet az élménynek, milyen érzés lépést tartani Kip szárnyaló gondolataival.

Christopher Nolan
Los Angeles, Kalifornia
2014. július 29.

BEVEZETÉS

Fél évszázados tudományos pályafutás áll mögöttem. Munkám (legtöbbször) örömmel töltött el, és hozzásegített ahhoz, hogy alapos áttekintésem legyen világunkról és az univerzumról.

Gyermekeként és később tizenévesként Isaac Asimov, Robert Heinlein és mások sci-fi, illetve Asimov és a fizikus George Gamow tudományos népszerűsítő könyveinek hatására akartam tudós lenni. Nagyon sokkal tartozom nekik. Régóta szeretném visszafizetni ezt az adósságot azzal, hogy átadom üzeneteiket a következő generációknak: fiatalokat és felnőtteket egyaránt a tudomány világába csábítani, a valódi tudományéba, elmagyarázva azt, hogyan is működik, és mekkora hatalmat ad nekünk, akár az egyén, akár a civilizáció, az egész emberi faj szintjén.

Christopher Nolan *Csillagok között* című filmje ideális hordozója az üzenetnek. Nagy szerencsém volt (tényleg szerencse volt), hogy már a kezdetektől részt vehettem a *Csillagok között* megvalósításában. Segítettem Nolannek és munkatársainak valódi tudományt szőni a film szövegébe.

A *Csillagok között* tudományának legnagyobb része mai tudásunk határain vagy azon túl helyezkedik el. Ez hozzájárul a film titokzatosságához, és lehetőséget biztosít számomra, hogy elmagyarázzam, mi a különbség a szilárd alapokon nyugvó tudományos igazságok, a megalapozott feltételezések és a spekulációk között. Megvilágíthatom, hogy a tudósok a spekulációként felmerülő ötleteket hogyan vetik el vagy fejlesztik tovább megalapozott feltételezéseké, esetleg bizonyított tudományos tényekké.

Kétféle módon fogom ezt megtenni: Az egyik, hogy *elmagyarázom*, mit tudunk ma a filmben látható jelenségekről (fekete lyukak, féregjáratok, szingularitások, ötödik dimenzió és egyebek), majd vázolom azt is, miként kerültünk ezen tudás birtokába, és hogyan reméljük felderíteni majd a még ismeretlent. A másik, hogy a tudós nézőpontjából *értelmezem*, amit a *Csillagok között*-ben látunk, hasonlóan ahhoz, ahogyan egy műkritikus vagy egy közönséges néző értelmez például egy Picasso-festményt.

Magyarázatom gyakran annak leírása, hogy mit gondolok arról, ami a színfalak mögött lehet: a Gargantua fekete lyuk fizikája, szingularitása, eseményhorizontja és vizuális megjelenése, miként hoz létre a Gargantua gravitációs árapályereje kilométernél is magasabb víz hullámokat Miller bolygóján, hogyan utaztathatja egy négy térdimenziós objektum, a hiperkocka¹ a háromdimenziós Coopert az ötdimenziós hipertéren keresztül és így tovább.

¹ Angolul és a könyvben is a tesseract kifejezést használják a megjelölésére, amely magyarul teszerakt lehetne (ezt időnként alkalmazzák is, leginkább sci-fi témákban), a filmben azonban hiperkocká-nak fordították, így mi is ennél maradunk. Ennek kapcsán megemlítyük, hogy a könyvben sok idézet is van a filmből, ezek esetében is igyekeztünk szó

Más esetekben értelmezésem a *Csillagok között* történetének *extrapolációja* a filmben láthatókon túlra. Ilyen például az, hogy még jóval a film cselekményének kezdete előtt hogyan fedezhette fel Brand professzor a féregjárat létezését a Gargantua közelében keringő neutroncsillag által keltett, a féregjáraton át a Földet elérő gravitációs hullámok detektálásával.

Ezek a magyarázatok természetesen teljes egészükben tőlem származnak. Christopher Nolan nem láttamozta őket, mint ahogyan a műkritikusok véleményét sem szentesítette Pablo Picasso. Segítségükkel fogok leírni csodálatos tudományos eredményeket.

A könyv néhány része talán nehezen emészthető. De a valódi tudomány már csak ilyen. Töprengést igényel. Gyakran mély gondolatokat. A gondolkodás azonban kifizetődő lehet. Az olvasó persze egyszerűen átugorhatja a nehéz részeket, de meg is küzdhet velük a megértés érdekében. Ha azonban nem jár sikerrel, az nem az ő hibája, egyedül csakis az enyém, előre elnézést is kérek érte.

Remélem azonban, hogy legalább egyszer, az éjszaka közepén félálomban elgondolkodik valamin abból, amit írtam, ahogyan én is éjszakákat töprengtem azokon a kérdéseken, amelyeket Christopher Nolan vetett fel, miközben a forgatókönyvét csiszolgatta. És különösen remélem, hogy a kedves olvasó legalább egyszer a heuréka pillanatát is átéli egy ilyen éjszakán, ahogyan az velem is gyakran megtörtént Nolan kérdéseinek kapcsán.

Hálás vagyok Christopher Nolannek, Jonathan Nolannek, Emma Thomasnak, Lynda Obstnak és Steven Spielbergnek, hogy Hollywoodba invitáltak, csodálatos lehetőséget biztosítva számomra, hogy valóra válthassam az álmom, és átadhassam a következő generációnak az üzenetet a tudomány szépségéről, varázsáról és erejéről.

Kip Thorne
Pasadena, Kalifornia
2014. május 15.

INTERSTELLAR
VALÓDI TUDOMÁNY A *CSILLAGOK*
KÖZÖTT

1. Egy tudós Hollywoodban:

A CSILLAGOK KÖZÖTT SZÜLETÉSE

Lynda Obst, hollywoodi alkotótársam

A *Csillagok között* csírája egy elvetélt románc eredménye, amely azonban alkotó barátsággá és kapcsolattá fejlődött.

1980 szeptemberében felhívott barátom, Carl Sagan. Tudta, hogy egyedülálló apaként nevelem tizenéves lányomat (legalábbis megpróbáltam, nem túl nagy sikerrel) a dél-kaliforniai szinglik életét élve (ebben már kicsit jobb voltam), miközben elméleti fizikusi karrieremet is építgetem (na, ez már sokkal jobban ment).

Carl azért hívott, hogy összehozzon valakivel. Azt szerette volna, hogy Lynda Obst társaságában vegyek részt *Kozmosz* című televíziós sorozatának világpremierjén.

Lyndát, a *New York Times Magazine* alternatív kultúrákkal és tudománnyal foglalkozó briliáns és gyönyörű szerkesztőjét abban az időben vonszolta át Los Angelesbe a férje, ami nagyban hozzájárult különválásukhoz. Láthatólag nehéz helyzetéből Lynda megpróbálta a lehető legjobbat kihozni, a filmiparban akart szerencsét próbálni a *Flashdance* című mozi ötletével.

A *Kozmosz* premierje illusztris esemény volt a Griffith Obszervatóriumban. Ilyen irányú tapasztalatokkal nem rendelkezvén, én egy bilikék szmokingban jelentem meg. Mindenki ott volt, aki számított Los Angelesben. Bár „természetes közegemen” kívülre kerültem, nagyon jól éreztem magamat.

A következő két évben Lynda és én időnként jártunk, a kémia azonban nem igazán akart működni közöttünk. Intenzitása lenyűgözött, de ki is merített. Nem voltam biztos benne, hogy előbbi megéri-e az utóbbit, de végül nem én választottam. Nem tudom, talán a bársonyíngem és a dzsörzégatyám miatt, de Lynda hamarosan elvesztette romantikus érdeklődését irántam, elkezdődött azonban valami jobb: egy időtálló, kreatív baráti és munkakapcsolat két nagyon különböző világból érkezett, egészen különböző ember között.

Ugorjunk egy nagyot az időben 2005 októberéig, egyik alkalmi vacsoránkig, ahol a beszélgetés témái a kozmológia aktuális eredményeitől a baloldali politikáig, a nagyszerű ételig és a filmkészítés hullámvasútjáig terjedtek. Lynda addigra már Hollywood legrutinosabb és legsokoldalúbb producerei közé tartozott (*Flashdance*, *A halászkirály legendája*, *Kapcsolat*, *Hogyan vesszítünk el egy pasit 10 nap alatt?*). Én pedig megházasodtam. Feleségem, Carolee Winstein, Lynda legjobb barátnője lett. És nekem sem ment rosszul a fizika világában.

Vacsora közben Lynda mesélt egy ötletéről, amelyből sci-fi filmet tervezett, és arra kért, segítsék kidolgozni. Ez a második kiruccanása lett volna erre a területre: a velem való együttműködést pont úgy képzelte el, mint Carl Sagannel a *Kapcsolat* című film esetében.

Soha nem gondoltam rá, hogy egy film létrehozásában segédkezzek. Soha nem törekedtem arra sem, hogy Hollywoodban jelen legyek, eltekintve Lynda kalandjainak követésétől. Az általa felkínált együttműködés azonban kedvemre való volt, ráadásul ötletei között a féregjáratok is szerepeltek, ezzel az asztrofizikai koncepcióval kapcsolatban pedig én is úttörő munkát végeztem. Könnyen elcsábított tehát egy kis ötletelésre.

A következő négy hónap során néhány vacsora alkalmával, e-mailben és telefonon összeraktuk a film nyers vázlatát. Szerepeltek benne féregjáratok, fekete lyukak, gravitációs hullámok, ötdimenziós univerzum és az emberiség találkozása magasabb dimenziós lényekkel.

Számomra azonban az volt a legfontosabb, hogy egy kasszasikernek ígérkező filmre vonatkozó elképzelésünk *a kezdetektől fogva tudományos alapokon nyugodott*. Az emberi tudás határain vagy azon éppen túl elhelyezkedő, de tudományos ismereteken. Egy film, amelyben a rendező, a forgatókönyv írója és a producerek is tiszteletben tartják a tudományt, inspirációt merítenek belőle, és teljes egészében átszövik vele a történetet. Egy film, amely a nézőt megajándékozza azzal a csodálatos felismeréssel, hogy univerzumunkat a fizika törvényei irányítják, és az emberiség milyen óriási dolgokat érhet el, ha megérti ezeket a törvényeket. Egy film, amely sok nézőt arra készíthet, hogy többet tudjon meg a tudományról, és talán még tudományos pályára is lépjen.

Kilenc évvel később a *Csillagok között* minden elképzelésünket megvalósította. Az ide vezető út azonban kicsit hasonlított a „Perils of Pauline” című film főhősné kalandjaira, sok-sok olyan buktatóval, amelyek miatt az álmunk majdnem szertefoszlott. Rendezőnek megnyertük a legendás Steven Spielberget, aki azonban később megvált tőlünk. A forgatókönyv írására a fiatal és tehetséges Jonathan Nolant szereztük meg, ő kétszer hagyott ott bennünket, ráadásul mindkét alkalommal kritikus fázisban és több hónapra. A film rendező nélkül két és fél éven keresztül a pokol tornácán billegett. Ekkor azonban szinte hihetetlen módon feltámadt hamvaiból, és Jonathan bátyjának, Christopher Nolannek, generációja legtehetségesebb rendezőjének kezébe került.

Steven Spielberg, az első rendező

2006 februárjában, négy hónappal azután, hogy elkezdjük az ötletelést, Lynda együtt ebédelt Todd Feldmannel, Spielberg ügynökével (Creative Artists Agency). Amikor Feldman megkérdezte, hogy milyen filmen dolgozik éppen, Lynda elmesélte neki együttműködésünket és az elképzelésünket egy olyan sci-fi moziról, amely a kezdetektől tudományos alapokon nyugszik - azaz álmunkat a *Csillagok között-ről*. Feldman fellelkesült. Úgy vélte, Spielberget érdekelni fogja a

dolog, és arra biztatta Lyndát, hogy még *aznap* küldjön neki egy „treatment”-et! (A „treatment”² a film történetének és a karaktereknek rövid leírása, általában húsz oldal körüli terjedelemben.)

Sajnos leírva nem volt másunk, csak pár e-mail és feljegyzés a vacsorák közben folytatott beszélgetésekről. Így néhány napon keresztül szélvészsebességgel dolgoztunk egy nyolcoldalas filmvázlat megírásán, amelyre nagyon büszkék voltunk, és el is küldtük. Pár nap múlva egy e-mail jött Lyndától: „Spielberg elolvasta, és nagyon érdekli. Össze kell hoznunk vele egy rövid találkozót. Benne vagy? XX Lynda.”

Hogy ne lettem volna benne! De egy héttel később, még mielőtt a találkozó létrejött volna, Lynda felhívott: „Spielberg aláírt a *Csillagok között* rendezésére!” Madarat lehetett volna fogatni vele. Velem is. „Ilyen még soha nem történt Hollywoodban - mondta nekem. - Soha.” Most azonban igen.

Ezután bevallottam Lyndának, hogy életemben csak egyetlen Spielberg-filmet láttam, az *ET-t* természetesen. (Felnőttként egyáltalán nem érdekeltek a filmek.) Így tehát házi feladatot adott: Spielberg-filmek, amelyeket Kipnek meg kell néznie.

Egy hónappal később, 2006. március 27-én aztán sor került első összeövetelünkre Spielberggel - vagy Stevennel, ahogyan elkezdtem hívni őt. Egy otthonos konferenciateremben találkoztunk az Amblin nevű produkciós cégének központjában, Burbankben.

A találkozón két alapelvet javasoltam Stevennek és Lyndának a *Csillagok között* tudományos hátterével kapcsolatban:

1. A filmben semmi ne legyen, ami sérti a fizika jól ismert törvényeit vagy kellően megalapozott tudásunkat az univerzumból.

2. A kevésbé megalapozott fizikai törvényekkel és az univerzummal kapcsolatos spekulációknak (akár a legvadabbaknak is) mindig legyen valamilyen tudományos alapjuk, vagy olyan elképzelésekből származzanak, amelyeket legalább néhány „nagynevű” tudós lehetségesnek tart. Úgy tűnt. Steven vevő ezekre az irányelvekre, és támogatta Lynda azon javaslatát is, hogy állítsunk fel egy tudósokból álló csoportot, egy *Csillagok között* Tudományos Műhelyt, amely ötletekkel támogatna bennünket.

A csoport tanácskozását június 2-án tartottuk a Kaliforniai Műszaki Egyetemen (California Institute of Technology, Caltech), egy konferenciateremben az irodám közelében.

A nvolc órán át tartó, kötetlen, jó hangulatú megbeszélésen tizennégy tudós (asztrobiológusok, bolygókutatók, elméleti fizikusok, kozmológusok, pszichológusok, űrjogi szakértő) mellett Lynda, Steven. Steven édesapja, Arnold és én vettem részt. Kimerülten,

² A magyar filmszakirodalomban szintén az angol kifejezést használják, mi azonban a néhány további előfordulásakor a filmvázlat kifejezést alkalmazzuk inkább.

de felvillanyozva, új ötletek garmadájaival és régi ötleteink kritikájával álltunk tel. Stimulánsok Lyndának és nekem a filmvázlat átdolgozásához és kibővítéséhez.

Más kötelezettségeink miatt ez végül hat hónapunkba telt, de 2007 januárjára a vázlat harminchét oldalra hízott, és még tizenhat oldal taglalta a *Csillagok között* tudományos hátterét.

Jonathan Nolan, a forgatókönyvíró

Ezzel egyidejűleg Lynda és Steven a lehetséges forgatókönyvírókat kereste. A hosszú folyamat végén a választás a harmincegy éves Jonathan Nolanre esett, aki (testvérével, Christopherrel közösen) addig mindössze két forgatókönyvet jegyzett - *A tökéletes trükk*, *A sötét lovag* -, igaz, mindkét film nagy siker lett.

Jonathan, vagy Jonah, ahogyan barátai hívják, a tudományban kevésbé volt jártas, de nagyon kíváncsi volt, és lelkesen tanult. Hónapokon keresztül szinte falta a *Csillagok között* tudományos alapjaival kapcsolatos könyveket, és számtalan kérdést tett fel. Ragyogó új ötletei is voltak a filmhez, amelyeket Steven, Lynda és én is magunkévá tettünk.

Élvezetes volt vele dolgozni. Rengeteget beszélgettünk a *Csillagok között* tudományos kérdéseiről, általában két-három órás ebédek közben, amelyeket a Caltech Athenaeum nevű klubjában fogyasztottunk el. Jonah mindig számos új ötlettel és kérdéssel érkezett ezekre az ebédekre, amelyekre azonnal reagálnom kellett volna: ez tudományosan lehetséges, ez nem... A reakcióim néha nem voltak megalapozottak. Jonah azonban sürgetett volna: Miért? Mi a helyzet a...? De én lassú vagyok. Inkább hazamentem, és aludtam rá egyet. Az éjszaka közepén, amikor zsigeri reakcióim emlékei már elhalványultak, gyakran megtaláltam a módját, hogyan működjön, amit szeretett volna működőképesnek látni. Vagy találtam valami alternatívát arra, amit keresett. Félálomban jobban ment a kreatív gondolkodás.

Másnap reggel összerendeztem az éjszaka közepén gyorsan papírra vetett jegyzeteimet, és írtam Jonah-nak egy e-mailt. Ő pedig vagy felhívott, vagy szintén küldött egy e-mailt, esetleg egy újabb ebédre kerítettünk sort, így haladtunk előre. Ilyen módon jutottunk el a gravitációs anomáliákhoz és ahhoz a kihíváshoz, hogy felhasználhatók-e azok az emberiség Földről való elköltöztetésében. Rájöttem, hogy az anomáliák tudományos szempontból miként lennének lehetségesek, és ehhez csak egy kicsit kellett túllépnem jelenlegi tudásunk határain.

Kritikus időszakokban Lyndát is bevontuk. Kiváló érzékkel bírálta az ötleteinket, és vett rá bennünket arra, hogy teljesen új irányokba is elinduljunk. Az ötleteléseinkkel párhuzamosan varázserejével a Paramount Pictures stúdiót is sakkban tartotta, így egyelőre beleszólás nélkül dolgozhattunk azon, hogy a *Csillagok között* tényleg elkészülhessen.



1.1. ábra.

Jonah Nolan, Kip, és Lynda Obst.

2007 novemberére Jonah, Lynda, Steven és én közös nevezőre jutottunk a Lyndával írt eredeti filmvázlatunkon alapuló, de radikálisan átdolgozott történet szerkezetét illetően, amibe természetesen bekerültek Jonah ötletei, illetve a megbeszéléseink eredményei is - Jonah pedig keményen dolgozott a forgatókönyvön. 2007. november 5-én azonban bejelentették az Amerikai Forgatókönyvírók Céhének sztrájkját. Attól kezdve Jonah egy betűt sem írhatott le, el is tűnt.

Megrémültem. Lehet, hogy minden eddigi munkánk kárba vész, ál munkánk pedig szertefoszlik?, kérdeztem Lyndát. Türelemre intett ugyan, de szemmel láthatóan ő is igen nyugtalan volt. A sztrájk történetét nagyon plasztikusan írja le a *Sleepless in Hollywood* című könyvében, az ezzel foglalkozó fejezet címe: „The Catastrophe”.

A sztrájk három hónapig tartott. Február 12-én, amikor vége lett, Jonah visszatért az íráshoz, illetve a Lyndával és velem folytatott élénk vitákhoz. A következő tizenhat hónap során megírta a forgatókönyv nagyon hosszú és részletes vázlatát, majd ezt követően magát a forgatókönyvet is három egymást követő változatban. Amikor valamelyikkel elkészült, találkoztunk Stevennel és megvitattuk. Ő egy órán át vagy még hosszabban kérdezgetett, mielőtt megtette volna javaslatait, kéréseit vagy instrukcióit a változtatásokra. Nem túlságosan aktívan, de kreatívan állt hozzá, mindig a lényegre tapintott, néha pedig nagyon határozott volt.

2009 júniusában Jonah leadta a forgatókönyv harmadik változatát, majd eltűnt a színről. Már régen elvállalta *A sötét lovag: Felemelkedés* című film forgatókönyvének megírását, amivel a *Csillagok között* írása miatt nagy csúszásban volt. Többet már nem késhetett, így ismét forgatókönyvíró nélkül maradtunk. Ráadásul édesapja súlyosan megbetegedett, így Jonah hónapokat töltött mellette Londonban, egészen apja decemberben bekövetkezett haláláig. Aggódtam, hogy a hosszú szünet miatt Steven előbb-utóbb elveszíti az érdeklődését.

Ő azonban velünk együtt várta Jonah visszatérését. Lyndával szerződthettek volna valaki mást a forgatókönyv befejezésére, de annyira becsülték a tehetségét, hogy inkább vártak.

Végül 2010. február 10-én Jonah visszatért, március 3-án pedig Steven, Lynda, Jonah és én egy rendkívül gyümölcsöző megbeszélést tartottunk a forgatókönyv kilenc hónappal korábbi harmadik változatáról. Kicsit bele is szédültem. Végre újra sínen voltunk.

Június 9-én azonban, miközben Jonah a negyedik változaton dolgozott, egy e-mailt kaptam Lyndától: „Problémáink vannak Steven szerződésével. Már próbálok intézkedni.” A probléma azonban megoldhatatlannak bizonyult. Spielberg és a Paramount nem tudott megegyezni a *Csillagok között* munkálatainak következő fázisáról, Lynda pedig nem járt eredménnyel a közvetítésben. Hirtelen rendező nélkül maradtunk.

Steven és Lynda egymástól függetlenül azt mondták nekem, hogy a *Csillagok között* egyre drágább lett, és nagyon kevés olyan rendező volt, akire egy ilyen léptékű mozit a Paramount rá mert volna bízni. A film ügyét újra reménytelennek láttam, lassú kimúlásának lehetősége pedig teljesen lehangolt. Először Lyndával is ez történt. Ő azonban nehezen adja fel.

Christopher Nolan, a rendező és forgatókönyvíró

Mindössze tizenhárom nappal Lynda problémát jelző e-mailje után egy újabb, ezúttal azonban eufórikus üzenetet találtam tőle a postafiókomban: „Sikerült beszélnem Emma Thomasszal...” Emma Christopher Nolan felesége, producer, aki férje mindegyik filmjében közreműködött. Őt is és Christophert is érdekelte a tervünk. Lynda szinte remegett az izgalomtól. Jonah felhívta és azt mondta neki, hogy „ez a lehetséges legjobb kimenetel”. A megegyezés azonban több okból kifolyólag még két és fél évig nem jött létre, bár mi teljesen biztosak voltunk benne, hogy Christopher és Emma elkötelezték magukat a film mellett.

Így tehát ültünk és vártunk. 2010 júniusától kezdve egészen 2012 szeptemberéig. Én egyáltalán nem voltam nyugodt. Lynda ugyan magabiztosnak mutatkozott előttem, később azonban bizalmasan megmutatta, hogy miket írogatott magának: „Holnap talán arra ébredünk, hogy két és fél év várakozás után Chris Nolan szedi a sátorfáját. Lehet, hogy a saját ötletével áll elő. Esetleg egy másik producertől olyan forgatókönyvet kap, amelyik jobban tetszik neki. Vagy csak szünetet szeretne tartani. Ez esetben viszont hülye vagyok, ha várok rá. Ez van. Hiába, ilyen a producerek élete. De ő a tökéletes rendező számunkra. Szóval mégiscsak várunk.”

Végül elkezdődtek a tárgyalások, a licitek messze-messze az én fizetési kategóriám Felett indultak. Christopher Nolan azonban csak akkor akart rendezni, ha a Paramount a Warner Bros. stúdióval közösen készíti el a filmet. Nolan ez utóbbinál forgatta legutóbbi munkáit, így a szerződést - egy rendkívül összetett megállapodást - az egyébként rivális stúdiók között kellett nyélbe ütni.

Végül 2012. december 18-án Lynda ezt írta: „A Paramount és a Warner megegyeztek a feltételekben. Mintha hájjal kenetnének! Tavasszal kezdünk!!!” Innentől kezdve pedig,

Christopher Nolannel a kormányruánál végig jó szélben vitorláztunk - már amennyire én ezt meg tudom ítélni. Végre! Tiszta helyzet.

Christopher jól ismerte Jonah forgatókönyvét. Elvégre testvérek, és beszélgettek is róla, miközben Jonah írta. Forgatókönyvírói együttműködésük hihetetlenül sikeres történetének



1.2. ábra

Kip és Christopher Nolan beszélgetnek a forgatáson az Endurance vezérlőmoduljában

mérföldkövei: *A tökéletes trükk*, *A sötét lovag* és *A sötét lovag: Felemelkedés*. Az első változatokat Jonah írta, majd azokat Christopher vette kézbe és gyúrta át, gondosan ügyelve arra, hogy a leírtakat mint szeretné majd a vásznon látni.

Most, hogy a *Csillagok között* immár teljesen Christopher kezében volt, Jonah forgatókönyvét összeházasította egy másik projektével, amelyen dolgozott, radikálisan új nézőpontokat és rengeteg friss ötletet illesztve így a hímbe, olyan ötleteket, amelyek nem várt új irányokba vitték el a mozit.

Amikor január közepén felhívtam, Chris - hamarosan már így szólítottam - arra kért, hogy négyszemközt beszéljünk az irodájában Syncopy nevű, a Warner Bros. telephelyén működő produkciós cégénél.

A beszélgetés közben nyilvánvalóvá vált számomra, hogy Chris figyelemre méltó ismeretekkel, mi több, mély intuíciókkal rendelkezik a film tudományos háttéréről. A megérzései néha hamisak voltak, a legtöbbször azonban helyesen tapintott a lényegre. És hihetetlenül kíváncsi volt. Gyakran elkalandoztunk más tudományos témák felé is, amelyek foglalkoztatták és elbűvölték.

Első találkozásunkkor Chrisnek is lefektettem tudományos alapelveimet: Semmi sem sértheti a fizika szilárd alapokon nyugvó törvényeit, a spekulációknak pedig mindig tudományos alapról kell kiindulniuk. Pozitívan állt a kérésemhez, de megjegyezte, hogy ha nem

tetszene, ahogyan a tudományt kezeli, a nyilvánosság előtt nem kell a védelmére kelnem. Ez akkor kicsit meglepett. Most azonban, amikor a filmen már az utómunkákat végzik, lenyűgöz, mennyire betartotta az irányelveimet, miközben vigyázott, hogy ne akadályozzák abban, hogy jó mozit csináljon.

Január közepétől május elejéig Chris keményen dolgozott Jonah forgatókönyvének átírásán. Ő vagy az asszisztense, Andy Thompson időről időre felhívtak, és megkértek, hogy menjek el hozzá az irodájába vagy a lakására, hogy a tudományos részletekről beszéljünk, vagy azért, hogy olvassam el a forgatókönyv új változatát, aztán találkozzunk, hogy megbeszélhessük. Ezek a diszkussziók hosszúak, általában másfél órák voltak, és néha szintén hosszú telefonbeszélgetés követte őket másnap vagy harmadnap. Töprengésre készítő ötletei voltak. Mint ahogyan Jonah esetében is, a legjobb gondolataim éjszaka támadtak. Másnap reggel összefoglaltam ezeket egy néhány oldalas emlékeztetőben, diagramokkal, képekkel, és elvittem Chrisnek. (Chris aggódott amiatt, hogy ötleteink kiszivárognak és aláássák az egyre növekvő rajongói várakozásokat. Ő a leginkább titkolózó hollywoodi rendezők egyike.)

Néha úgy tűnt, Chris ötletei ütköznek az alapelveimmel, de érdekes módon majdnem mindig megtaláltam a módját, hogy tudományos szempontból működőképesé tegyem azokat. Mindössze egyetlen alkalom volt, amikor csúfosan megbuktam. Válaszul Chris - egy kéthetes periódus több megbeszélése után - visszakozott, és a film egy részét kicsit más irányba vitte el.

Így a végén nem kellett aggódnom, hogy miként védem meg azt, amit Chris a tudománnyal művelt. Éppen ellenkezőleg, nagyon lelkes vagyok! Valóra váltotta Lyndával közös álmunkat egy olyan kasszasikernek ígérkező filmről, amely valódi tudományos alapokon nyugszik, és valódi tudomány szövi át.

Jonah és Chris kezei között a film története radikálisan megváltozott. Eredeti vázlatunkra csak nagy vonalakban emlékeztetett. Viszont sokkal jobb lett! A tudományos alapokhoz hasonlóan tehát nem ragaszkodtam körömszakadtáig a saját változatomhoz. Chris maga is figyelemre méltó tudományos ötletekkel járult hozzá a filmhez. Olyanokkal, amelyekről fizikus kollégáim biztosan azt gondolják majd, hogy én találtam ki azokat, olyanokkal, amelyeket én is szívesen a magaménak tudnék, ha nekem jutottak volna eszembe. Néha elmerengek azon, én vajon miért nem gondoltam ezekre? Remek ötletek szökkentek szárba Chrisszel, Jonah-val és Lyndával folytatott megbeszéléseimből.

Egy áprilisi estén Carolee és én nagy partit rendeztünk pasadenai otthonunkban Stephen Hawking tiszteletére, körülbelül száz, különböző foglalkozású vendéggel: tudósok, művészek, írók, fotográfusok, filmesek, történészek, tanárok, közösségszervezők, szakszervezeti szervezők, üzletemberek, építészek és sokan mások. Chris és Emma is eljött, ahogyan Jonah Nolan és felesége, Lisa Joy, és természetesen Lynda is. Késő este mindannyian az erkélyen időztünk, a csillagok alatt,

messze a parti zajától, és csendesen beszélgettünk - ez volt az első alkalom, hogy nem a filmes Chrisszel társalogtam, hanem megismerhettem a magánembert. Rendkívül élvezetes volt!

Chris nagyon gyakorlatias, csodás vele beszélgetni, és remek, fanyar humora van. Egy másik barátomra, Gordon Moore-ra, az Intel alapítójára emlékeztet: Bár mindketten szakmájuk „csúcsragadozói”, mégis egészen szerények. Mindketten öreg autókat hajtanak, azokat részesítik előnyben a luxuskocsikkal szemben. Mindkettejük társaságában kiválóan érzem magamat, és tudva, hogy mennyire befelé forduló vagyok, ez nem semmi.

Paul Franklin, Oliver James, Eugénie von Tunzelmann: A vizuális effektusokért felelős csapat

2013 májusának közepén Chris felhívott, hogy szeretne elküldeni hozzám egy Paul Franklin nevű fickót, akivel a *Csillagok között* számítógépes grafikai kérdéseit kellene megbeszélnem. Paul másnap el is jött, és körülbelül két órát töltöttünk otthoni dolgozószobámban élvezetes ötletezéssel. Chris erélyességével szemben ő szerényen viselkedett, ennek ellenére briliáns volt. Mély ismeretei voltak a szükséges tudományos háttérrel, bár művészeti területen szerzett diplomát.

Mikor a végén Paul elkészönt, megkérdeztem, hogy melyik grafikus céggel tervezi a vizuális effektusok elkészítését. „Az enyémmel” - válaszolta szelíden. „És melyik az a cég?” - kérdeztem naivan. „A Double Negative. Ezer alkalmazottunk van Londonban és kétszáz Szingapúrban.”

Miután Paul elment, rákerestem a Google-ban és felfedeztem, hogy nemcsak a Double Negative társalapítója, de Oscar-díjat is nyert Chris *Eredet* című filmjének vizuális effektusaiért.³ „Most már tényleg itt az ideje, hogy többet megtudjak erről az egész filmbizniszről” - mormogtam magamban.

Egy néhány héttel későbbi videokonferencián Paul bemutatott a *Csillagok között* vizuális effektusokért felelős részlege londoni vezetőinek. Számomra a legfontosabbak Oliver James, a cég vezető kutatója, a vizuális effektusok alapjául szolgáló számítógépes kód fejlesztője és Eugénie von Tunzelmann, a művészeti részleg vezetője voltak. Mindenféle művészi varázslások után az Eugénie által vezetett csapat állította elő Oliver kódja alapján a film lenyűgöző képkockáit.

³ Közben Paul Franklin a *Csillagok között* vizuális effektusaiért is megkapta az Oscar-díjat.



1.2. ábra

Eugénie von Tunzelmann, Kip és Oliver James

Azok közül, akikkel a *Csillagok között* forgatása kapcsán találkoztam, Oliver és Eugenie voltak az elsők, akik fizikából is kaptak képzést. Oliver optikát és atomfizikát tanult az egyetemen, és tisztában volt Einstein speciális relativitáselméletének részleteivel is. Eugénie mérnökként végzett Oxfordban, főleg adatfeldolgozással és számítástudománnyal foglalkozott. Egy nyelven beszéltünk.

Nagyon gyorsan kialakult közöttünk a jól működő munkakapcsolat. Én több hónapon keresztül közel teljes munkaidőmben azzal foglalkoztam, hogy formába öntsem azokat az egyenleteket, amelyek a fekete lyukak és a féregjáratok közelében írják le az univerzum kinézetét ([8.](#) és [15.](#) fejezet).



1.3. ábra

Eugénie von Tunzelmann, Kip, és Oliver James.

Az egyenleteimet kis felbontásban a Mathematica nevű felhasználóbarát szoftverben teszteltem, majd a Mathematica-kóddal együtt elküldtem őket Olivernek. Ő nagyon gyorsan betáplálta az egészet saját kifinomult programjába, amely képes volt előállítani a filmhez szükséges ultranagy felbontású IMAX-képeket, amelyeket aztán továbbított Eugénie csapatának. Nagyon jó volt velük dolgozni.

A végtermék, a *Csillagok között* vizuális effektusai egészen fantasztikusak! És nem kevésbé fontos, hogy tudományos szempontból pontosak.

Nem tudják elképzelni, mennyire fellelkesültem, amikor Oliver elküldte az előzetes klipjeit. Én voltam az első - minden más kutatót megelőzve -, aki láthatta, hogyan néz ki egy gyorsan forgó fekete lyuk ultranagy felbontásban, és az is látszik, mit tesz a környezetével.

Matthew McConaughey, Anne Hathaway, Michael Caine, Jessica Chastain

Július 18-án, két héttel a forgatás megkezdése előtt kaptam egy e-mailt a Coopert játszó Matthew McConaugheytól: „per interstellar” - írta. „Szeretnék néhány dolgot megkérdezni... Ha L. A. környékén jársz, akkor személyesen lenne a legjobb. Kérlek, értesíts, köszönöm. McConaughey.”

Hat nappal később találkoztunk a Beverly Hills-i L'Hermitage butikhotel egyik lakosztályában. Ide vonult vissza, hogy ráhangolódjon Cooper szerepére és a *Csillagok között* tudományára.

Érkezésemkor trikóban, rövidnadrágban és mezítláb nyitott ajtót. Sovány volt, mivel éppen akkor fejezte be a *Mielőtt meghaltam* forgatását (az abban nyújtott alakításáért később megkapta a legjobb férfi színésznek járó Oscar-díjat). Megkérdezte, hogy szólíthat-e Kip-nek? Azt feleltem, természetesen, és én is tudakoltam, hogyan szólítsam őt. „Bárhogyan, csak Mattnek ne, azt utálok. Matthew, McConaughey, Hé, te. Ahogyan szeretnéd.” A „McConaughey”-t választottam, mert olyan csodálatosan nyelvtörő, az életemben pedig rajta kívül is rengeteg Matthew van.

McConaughey egy L alakú kanapé és egy dohányzóasztal kivételével minden bútort eltávolított a lakosztály étkezővel kombinált hatalmas nappalijából. A padlón és az asztalon A/3-as méretű lapok hevertek szétszórva, mindegyik tele különböző témákkal kapcsolatos, összevissza írt megjegyzésekkel. Leültünk a kanapéra. Ő felkapott egy lapot, átfutotta, feltett egy kérdést, amelyik egyáltalán nem volt felszínes, és hosszan megbeszéltük, miközben ő újabb megjegyzéseket írt a papírra.

A társalgás, a papírokról megfélelkezve, gyakran váratlan irányokat vett. Hosszú idő óta az egyik legérdekesebb, legélvezetesebb beszélgetésem volt! A fizika, elsősorban a kvantumfizika törvényeitől eljutottunk a vallásig, a miszticizmusig, a *Csillagok között* tudományos hátteréig. Beszélgettünk a családjainkról, különös tekintettel a gyerekeinkre, életfilozófiánkról, arról, hogy honnan szerezzük inspirációinkat, hogyan gondolkodunk, hogyan fedezünk fel valamit. Két órával később teljesen feldobott hangulatban távoztam.

Később Lyndának megemlítettem a találkozónkat. „Hát persze” -mondta. Megtehetette volna, hogy felkészít arra, ami rám vár: a *Csillagok között* már a harmadik filmje volt McConaugheyvel. Nagyon örülök, hogy nem szólt előre. Nagy örömmel fedeztem fel saját magam.

A következő e-mail, néhány hét múlva, Anne Hathawaytól érkezett, aki Amelia Brand szerepét játssza. „Helló, Kip! Remélem, nem zavarlak ezzel a levéllel. Emma Thomas adta meg a címedet arra az esetre, ha bármilyen kérdésem lenne. Hát, a téma elég sűrű, szóval lenne néhány!... Beszélhetnénk? Nagyon szépen köszönöm, Annie.”

Telefonon léptünk kapcsolatba, mivel elfoglaltságaink nem engedték meg a személyes találkozást. Saját magát fizikarajongónak írta le, majd azt mondta, hogy a karaktere, Brand nagyon jól ért a fizikához - aztán egy sor meglepően hozzáértő fizikai kérdést tett fel: Mi az összefüggés az idő és a gravitáció között? Miért gondoljuk, hogy vannak magasabb dimenziók is? Mi a tudomány mai állása a kvantumgravitációval kapcsolatban? Van-e bármilyen kísérleti bizonyítékunk a kvantumgravitációra?... Csak a végén hagyta, hogy eltérjünk a tárgytól, mégpedig a zene felé. Középiskolában trombitán játszott, én pedig szaxofonoztam és klarinétoztam.

A *Csillagok között* forgatásán csak nagyon ritkán jelentem meg. Nem volt rám szükség. Egyik reggel azonban Emma Thomas végigvezetett az Endurance űrállomás parancsnoki és navigációs moduljának 1 : 1 léptékű modelljén a Sony stúdió 30-as műtermében.

Lenyűgöző volt: tizenhárom méter hosszú, nyolc méter széles, öt méter magas, a levegőben függött, vízszintes helyzetből teljesen függőlegesbe lehetett fordítani, és a részletek is tökéletesek voltak. Elbűvölt és felkeltette a kíváncsiságomat.

„Emma, miért építettétek fel ezt a hatalmas és bonyolult modellt, amikor ugyanezt számítógépes grafikával is meg lehetett volna csinálni?” „Nem egyértelmű, hogy melyik olcsóbb - válaszolta. - Ráadásul a számítógépes grafika képtelen visszaadni egy valódi díszlet vizuális részleteit.” Amikor csak lehetséges, ő és Chris élethű díszleteket és valódi effektusokat használnak, kivéve, ha valami nem filmezhető le ezen a módon, például a Gargantua fekete lyuk.

Egy másik alkalommal egyenletek és diagramok tucatjait írtam és rajzoltam Brand professzor fekete táblájára, és figyeltem, ahogyan Chris a professzort alakító Michael Caine-t és a Murphöt játszó Jessica Chastaint rendezte a professzor irodájában. Meglepődtem a barátságon és tiszteleten, amellyel Caine és Chastain viseltetett irányomban. Annak ellenére, hogy magában a filmben nem szerepeltem, én voltam a *Csillagok* hozott hírhedt valódi tudósa, az a fickó, aki mindenkit a legjobb teljesítményre sarkall, hogy tudományos szempontból is megfelelő legyen ez a kasszasiker-várományos mozi.

Ennek az ismertségnek köszönhetően olyan hollywoodi ikonokkal kerülhettem kapcsolatba, mint a Nolan testvérek, McConaugliey, Hathaway, Caine, Chastain és mások. Szórakoztató bonusz a Lyndával kötött alkotó barátságom mellé.

Most pedig következze Lyndával közös csillagközi álmunk végső fázisa. Az, amelyben felcsigázom az Önök kíváncsiságát a Csillagok között tudományos háttérével kapcsolatban, és megmagyarázom azokat a különös dolgokat, amelyeket a filmben láthatnak.

Jöjjenek a válaszok! Ezért írtam ezt a könyvet. Jó szórakozást!

I. ALAPOK

2. Univerzumunk dióhéjban

Univerzumunk óriási. Elbűvölően gyönyörű. Bizonyos értelemben meglepően egyszerű, másrészt azonban elképzelhetetlenül bonyolult. Világegyetemünk hihetetlen gazdagságából mindössze néhány alapvető tényre lesz csak szükségünk, a következőkben ezeket foglalom össze.

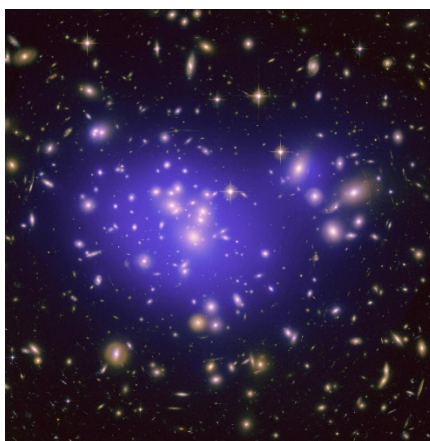
Ősrobbanás

Univerzumunk egy gigantikus robbanásban született 13,7 milliárd évvel ezelőtt. A robbanásnak az eléggé tiszteletlen „nagy bumm” nevet adta Fred Hoyle kozmológus barátom, aki az 1940-es években az elképzelést hihetetlennek és felháborítónak tartotta.

Frednek azonban nem volt igaza. Azóta ugyanis felfedeztük a robbanásból származó háttérsugárzást, és a jelen sorok írását megelőző hetekben is észlelési bizonyítékok láttak napvilágot a másodperc billiomod része billiomod részének billiomod részével a robbanás után kibocsátott sugárzásról!⁴

Nem tudjuk, mi okozta az ősrobbanást és azt sem, hogy mi volt előtte, már ha volt egyáltalán valami. Az univerzum ultraforró gáz hatalmas tendereként megszületett, és hihetetlen ütemben tágult minden irányban, mint egy termonukleáris bomba vagy egy gázvezeték robbanásának tűzlabdája. Azzal a különbséggel persze, hogy az ősrobbanás - legalábbis mai tudásunk szerint - nem rombolt. Éppen ellenkezőleg, *létrehozott* mindent az univerzumunkban, pontosabban mindennek a csíráit.

⁴ (A bámulatos felfedezésről a Google segítségével a következő keresőkifejezések alapján szerezhetünk további információt: „az ősrobbanás gravitációs hullámai” és „a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás polarizációja”. További részletekkel a [16.](#) fejezetben szolgálok. (A fordító megjegyzése: A 2014. márciusi bejelentést követően élénk vita alakult ki a tudományos közösségben arról, hogy valóban a keresett polarizációs mintázatot találták-e meg a BICEP és BICEP2 kísérletben. Egy évvel a szenzációs bejelentés után már egyértelműnek tűnik, hogy nem.)



2.1. ábra

Az Abell 1689 katalógusjelű gazdag galaxishalmaz sok más távoli galaxis társaságában a Hubble-űrtávcső felvételén

Nagyon szívesen írnék egy hosszú fejezetet az ősrobbanásról, nagy akaraterővel azonban visszatartom magam. A könyv további részeiben ugyanis nem lesz rá szükségünk.

Galaxisok

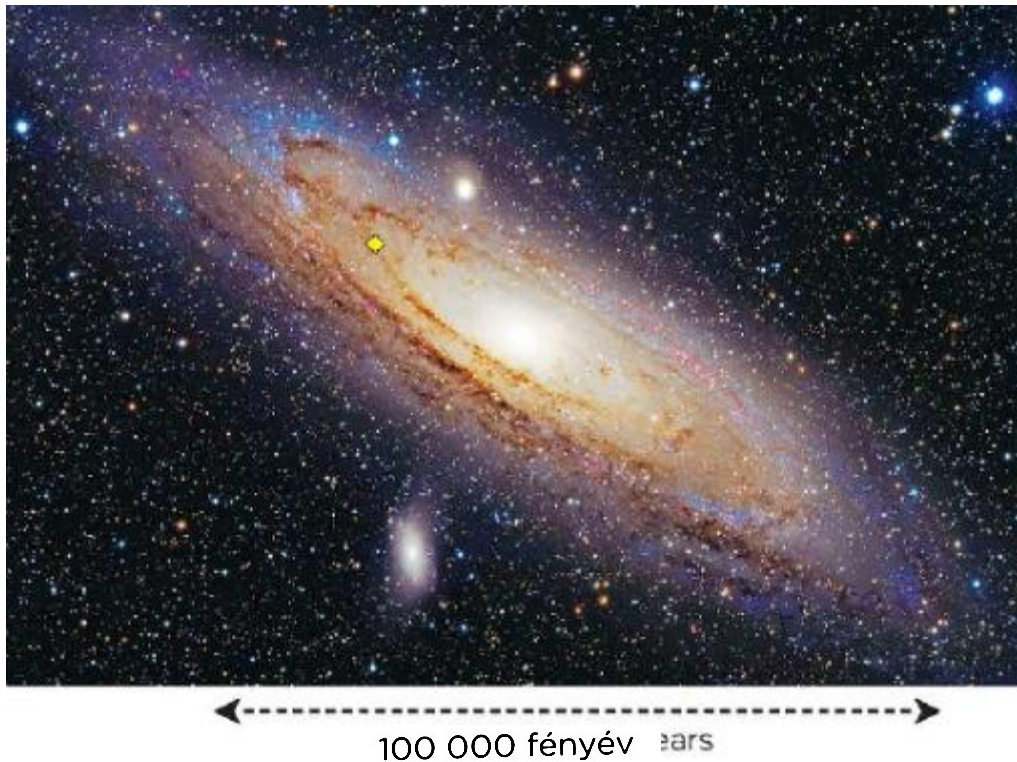
Amint univerzumunk tágult, a forró gáz hűlt. Egyes tartományokban sűrűsége véletlenszerűen kicsit nagyobb lett, mint más helyeken, Amikor a gáz kellő mértékben lehűlt, a gravitációs vonzás miatt a nagyobb sűrűségű régiók elkezdtek még tovább sűrűsödni, létrehozva az első galaxisokat, nagyszámú csillag és bolygók, valamint a köztük levő teret kitöltő diffúz gáz konglomerátumait (2.1. ábra). A legősibb galaxisok akkor alakultak ki, amikor az univerzum még csak néhány száz millió éves volt.

A megnövelhető világegyetemben körülbelül 1 billió (1000 milliárd) galaxis lehet. A legnagyobbak néhány billió csillagot tartalmaznak, a méretük pedig mintegy 1 millió fényév⁵, míg a csak körülbelül 10 millió csillagból álló legkisebbek átmérője mindössze ezer fényév körüli. Majdnem minden nagy galaxis középpontjában egy óriási fekete lyuk foglal helyet (5. fejezet), amely legalább milliószer nehezebb a Napnál.⁶

⁵ A fényév az a távolság, amekkorát a fény (elektromágneses sugárzás) egy év alatt megtesz, körülbelül 10 billió kilométer.

⁶ Kicsit pontosabban: a tömege legalább milliószerosan haladja meg a Napét, azaz egy adott távolságiból érzékelt gravitációs vonzereje akkora, mint egymillió Napé. A könyvben a „tömeg” és a „súly” („nehéz”) kifejezéseket ugyanabban az értelemben használom. (A könyv szerzője részéről ez bocsánatos bűn. Amúgy a súly és a tömeg nem egyenértékűek és nem is felcserélhető fogalmak. Például egy adott tömegű test súlya más a tengerszinten és egy magas hegycsúcson mérése. Vagy gondoljunk a Holdon leszállt űrhajósokra, akiknek a tömege mit sem változott az utozás során, de a Holdon a súlyuk a földi érték 1/6-a.)

A Föld a Tejútrendszernek nevezett galaxisban található. Csillagainak többsége abban a fényes sávban helyezkedik el, amelyik tiszta, sötét éjszakákon jól láthatóan húzódik keresztül az egész égbolton. De az éjszaka látható szinte összes többi fénypont is a Tejútrendszerhez tartozik.



2.2. ábra

Az Androméda-köd

A hozzánk legközelebbi nagy galaxis az Androméda-köd. Távolsága 2,5 millió fényév. Körülbelül 1 billió csillaga van, átmérője pedig mintegy 100 ezer fényév. A Tejútrendszer és az Androméda-köd akár ikertestvéreknek is tekinthetők, mivel hasonló a méretük, formájuk, és csillagaik száma is nagyjából megegyezik.

Az Androméda-ködben egy gigantikus fekete lyuk található, amely 100 milliószor nehezebb a Napnál, mérete pedig akkora, mint a Föld pályájáé. (Ugyanekkora tömegű és méretű a Gargantua a *Csillagok között*-ben, lásd a [6. fejezetet](#).) A [2.2. ábrán](#) a központi fényes dudorban foglal helyet.

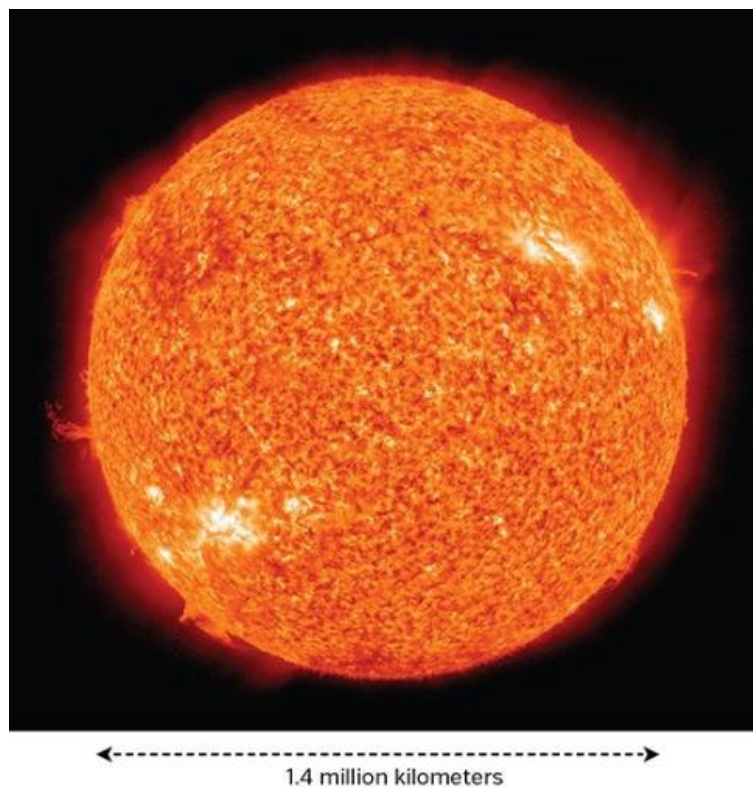
Naprendszer

A csillagok hatalmas, forró gázgömbök, magas hőmérsékletüket a magjukban zajló termonukleáris fúzió által termelt energia tartja fenn. A Nap átlagos csillag. Átmérője 1,4 millió

kilométer, százszorosa a Földének. Felszínét kitörések, forró és hidegebb foltok tarkítják, távcsöven keresztül fantasztikus látványt nyújt.⁷ ([2.3. ábra](#))

A Nap körül nyolc bolygó, köztük a Föld kering ellipszis alakú pályákon, sok törpebolygó (közülük a Pluto a leghíresebb), rengeteg üstökös és kisbolygónak (aszteroidának), illetve meteoroidnak nevezett kisebb, sziklás égitestek társaságában. A Föld a harmadik bolygó a Naptól számítva. A Szaturnusz, pompázatos gyűrű-rendszerével a hatodik, és a *Csillagok között*-ben is szerepet játszik ([15. fejezet](#)).

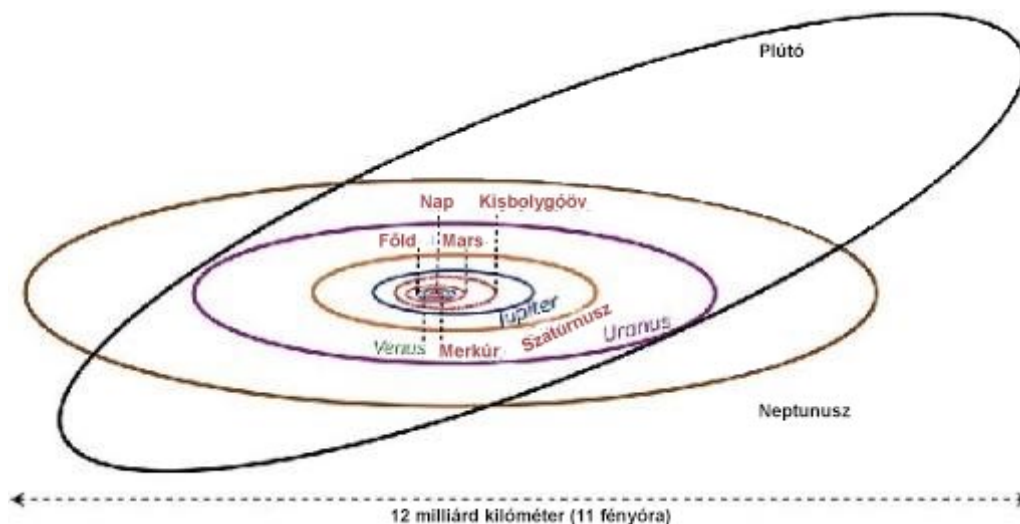
A Naprendszer ezerszer nagyobb, mint a Nap maga, a fénynek 11 órára van szüksége ahhoz, hogy átszelje.



2.3. ábra

A NASA Dynamics Observatory felvétele a Napról

⁷ Ügyeljünk arra, hogy megfelelő védelem nélkül szabad szemmel ne nézzünk a Napba! Különösen igaz ez a távcsöves megfigyelésekor. (A fordító megjegyzése.)



2.4. ábra

A nagybolygók és a Pluto Nap körüli pályái a kisbolygóövvel

A Naphoz legközelebbi csillag, a Proxima Centauri távolsága 4,24 fényév, ami 2500-szorosa a Naprendszer méretének! A 13. fejezetben tárgyalni fogom ennek a ténynek a csillagközi utazás lehetőségére vonatkozó rémisztő következményeit.

Csillagok halála: fehér törpék, neutroncsillagok és fekete lyukak

A Nap és a Föld nagyjából 4,5 milliárd éves, ami az univerzum korának harmada. Körülbelül 6,5 milliárd év múlva a Nap magjában elfogy a nukleáris fűtőanyag. Ekkor a fúzió áttevődik egy mag körüli héjba, miközben a Nap kitágul, felszíne a Földig ér, és felperzseli bolygónkat. Ha a héjban is elfogy az üzemanyag, a Föld pedig elpusztul, a Nap elkezd összehúzódni és fehér törpévé válik, amelynek mérete nagyjából a Földével egyezik meg, sűrűsége azonban milliószorosa bolygónkének. A fehér törpe lassan, fokozatosan, évtízmilliárdok alatt hűl ki, sűrű, sötét salakgolyót hagyva maga után.

A Napnál jóval nehezebb csillagok az üzemanyagukat is sokkal gyorsabban égetik el, a végén pedig összeroskadnak és neutroncsillag vagy fekete lyuk lesz belőlük.

Egy neutroncsillag tömege a Napénak 1-3-szorosa, kerülete 75-100 km körüli (ekkora körülbelül (Chicago), sűrűsége pedig megegyezik az atomok magjáéval, a földi kőzetek sűrűségének száz billiószorosa. A neutroncsillagok valójában tényleg szinte teljes mértékben maganyagból állnak: szorosan egymás mellé préselt atommagok alkotják őket.

2.5. ábra

Egy fehér törpe (balra), egy neutroncsillag (középen), és egy fekete lyuk (jobbra), mindegyik tömege a napénak 1,2-szerese. A fehér törpe esetében felszínének csak egy kicsiny szegmense ábrázolható

Ezzel ellentétben a fekete lyukak (5. fejezet) tisztán és kizárólag a tér és az idő görbületei (ezt a furcsa állítást a 4. fejezetben részletesen elmagyarázom). Semmiféle anyagot nem tartalmaznak, van azonban felszínük, amit „eseményhorizontnak” vagy

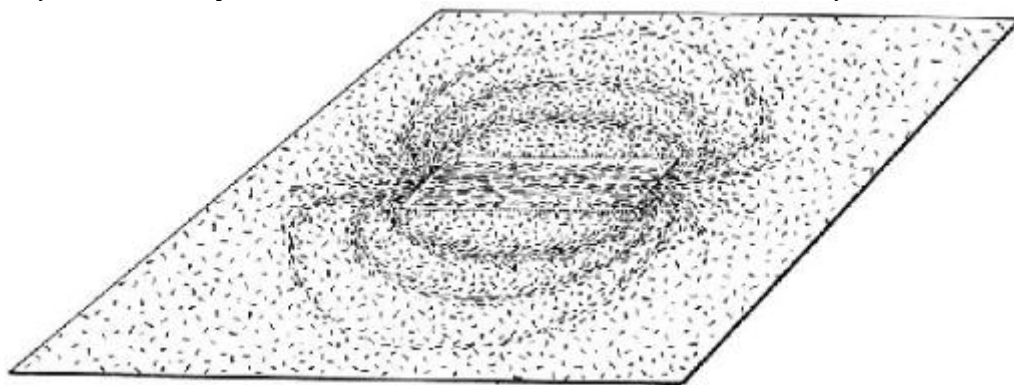
egyszerűen csak „horizontnak” hívunk, amelyen keresztül semmi, még a fény sem szökhet el. Ezért feketék. Egy fekete lyuk kerülete arányos a tömegével: minél nehezebb, annál nagyobb.

Egy fekete lyuknak, amelynek a tömege nagyjából annyi, mint egy tipikus neutroncsillagnak vagy fehér törpének (mondjuk 1,2 naptömeg), 22 kilométer körüli a kerülete: negyede egy neutron-csillagénak és ezredrésze egy fehér törpéének.

Mivel a csillagok tömege a legtöbb esetben nem haladja meg a Napénak a százszorosát, a fekete lyukak, amelyek létrejönnek belőlük, szintén nem nehezebbek 100 naptömegnél. A galaxisok centrumában helyet foglaló óriási fekete lyukak tömege azonban 1 milliótól 20 milliárd naptömegig terjed, ezért nem születhettek csillagok halálakor. Más módon kellett keletkezniük, például több kisebb fekete lyuk egyesülésével, vagy nagy tömegű gázfelhők kollapszusával (összeroskadásával).

Mágneses, elektromos és gravitációs mezők

Mivel a mágneses terek nagy szerepet játszanak az univerzumban, és fontosak a *Csillagok között*-ben is, ejtsünk néhány szót róluk, mielőtt elmerülnénk a film fizikájában.



2.6. ábra

Egy rúd mágnest mágneses erővonalai papírlapra szórt vasreszelék segítségével tehetők láthatóvá (Matt Zinet rajza alapján Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy)

Általános iskolai fizikaórán bizonyára mindenki találkozott a mágneses erővonalakkal az ismert mágneses-vasreszelékes kísérletben, amelyben egy papírlap alá rúd mágnest helyezünk, a lapra pedig vasreszeléket szórunk. Az elnyúlt szemcsék az egyébként láthatatlan mágneses erővonalak mentén rendeződnek, amelyek a mágnes egyik pólusából indulnak, körbeölelik a mágnest, és a másik pólusában végződnek. A mágneses mező a mágneses erővonalak összessége.

Ha megpróbálunk két mágnest az északi pólusaikkal egymáshoz közelíteni, a mágneses erővonalaik taszítják egymást. A mágnesek között nem látunk semmit, de érezzük a taszítóerőt.

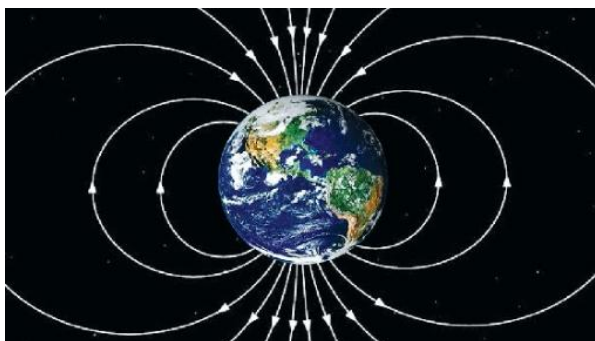


2.7. ábra

A világ első, közforgalomban használt mágnesvasútja a kínai Sanghajban

Ez felhasználható mágneses lebegtetésre, egy mágnesezett objektumnak - akár egy vonatnak is - a levegőben tartására.

A Földnek szintén van két mágneses pólusa, az északi és a déli. A mágneses erővonalak a déli pólusból indulnak, körbefogják a Földet, majd az északi pólusban végződnek.



2.8. ábra

A Föld mágneses erővonalai

Ezek az erővonalak ugyanúgy hatnak az iránytű mutatójára, mint a vasreszelék szemcséire, és amennyire lehet, a mutatót az erővonalak irányába állítják be. Így működik az iránytű.

A Föld mágneses erővonalai a sarki fény (aurora borealis⁸) által válnak láthatóvá.

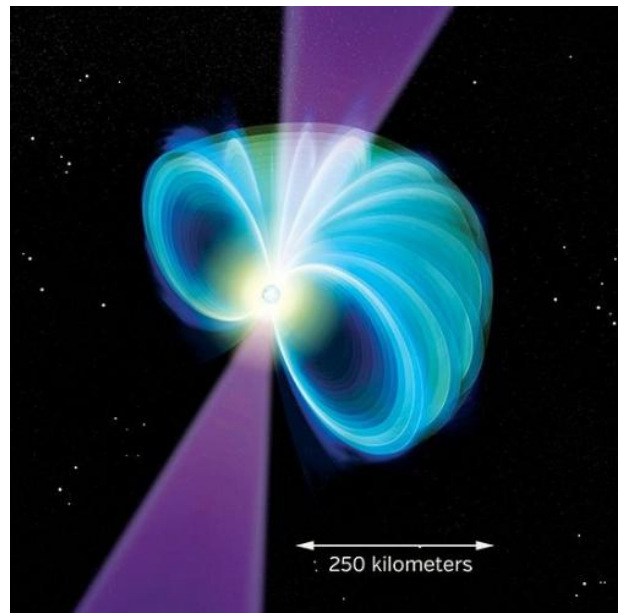
⁸ Az északi féltekén. A Föld déli pólusa környékén látható sarki fény neve aurora australis.



2.9. ábra

Sarki fény a norvégiai Hammerfest felett

A Napból kirepülő protonokat csapdába ejti a mágneses tér, a töltött részecskék a mágneses erővonalak mentén haladva a Föld légkörébe jutnak. Itt a protonok ütköznek az oxigén- és nitrogénmolekulákkal, ezáltal fénylésre (fluoreszcencia) készítetik azokat. Ez a fluoreszcens sugárzás a sarki tény.



2.10. ábra

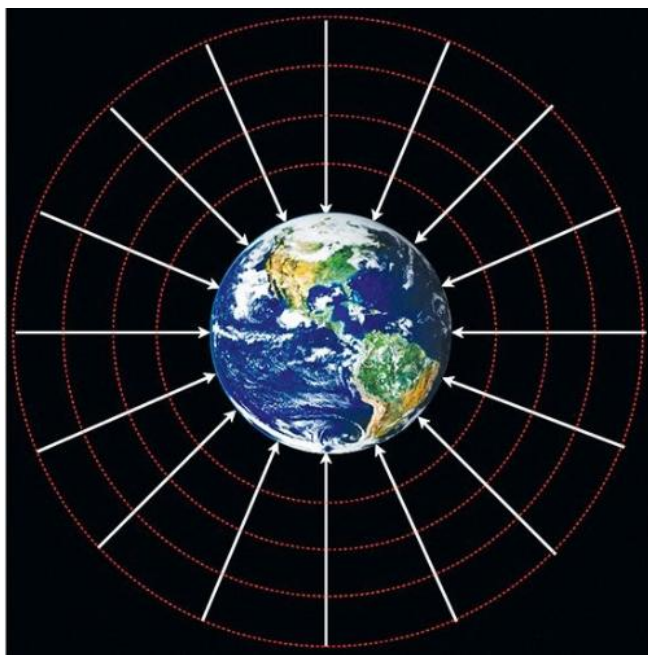
Fantáziakép egy neutroncsillagról tórusz alakú mágneses erővonalalaival és anyagáramaival.

A neutroncsillagoknak nagyon erős mágneses terük van, amelyben az erővonalak fánk alakot öltenek, hasonlóan, mint a Föld esetében. A neutroncsillag mágneses mezeje által csapdába ejtett, nagyon gyorsan mozgó részecskék sugárzása rajzolja ki a mágneses erővonalakat, és hozza létre a

kék gyűrűket. A részecskék egy része azonban kiszabadul, és a pólusoknál kifelé mozog, létrehozva az ábrán látható két nagy energiájú kilövellést. Ezekben mindenféle sugárzás jelen van: gamma-, röntgen-, ultraibolya, látható, infravörös és rádiósugárzás is. Amint a csillag forog, a fényes kilövellések végigsöprik a teret a neutroncsillag felett, hasonlóan egy világítótorony fénycsóvjához. Minden alkalommal, amikor a Föld az egyik csóvába kerül, a csillagászok egy sugárzási pulzust detektálhatnak, ezért is nevezték el ezeket az objektumokat „pulzároknak”.

Az univerzumban a mágneses mezőkön túl más típusú mezők (mező = erővonalak összessége) is vannak. Ilyen például az elektromos mező (elektromos erővonalak összessége, ez hajtja az elektromos áramot egy vezetőhuzalban). Másik példa a gravitációs mező (gravitációs erővonalak összessége, ami a Föld felszíne felé vonz bennünket).

A Föld gravitációs erővonalai sugárirányban befelé mutatnak, kijelölve az objektumokra ható vonzóerő irányát.



2.11. ábra

A Föld gravitációs erővonalai

Ennek nagysága az erővonalak sűrűségével arányos, tehát azzal, hogy adott nagyságú felületen hány darab erővonal halad át. Befelé haladva az erővonalak egyre kisebb felületű gömböket metszenek (vörös pontozott felületek a 2.11. ábrán), így a vonalsűrűség a gömbfelület nagyságával fordítottan arányos, ami azt jelenti, hogy a Föld gravitációs vonzóereje befelé haladva növekszik, mégpedig „ $1/(a \text{ vörös gömbök felszíne})$ ” módon. Mivel minden gömb felszíne a Föld középpontjától mért r sugarának négyzetével arányos, bolygónk gravitációs vonzása $1/r^2$ szerint változik. Ez a Newton-féle inverz négyzetes gravitációs törvény - egy példa

a fizika azon univerzális törvényeire, amelyekkel Brand professzor olyan szívesen töltötte idejét a *Csillagok között*-ben, egyben pedig következő alapvetésünk a film tudományos háttérével kapcsolatban.

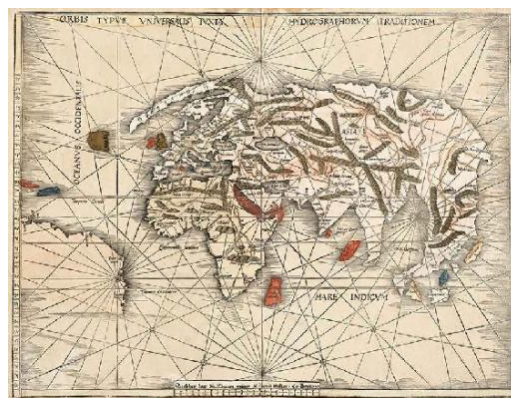
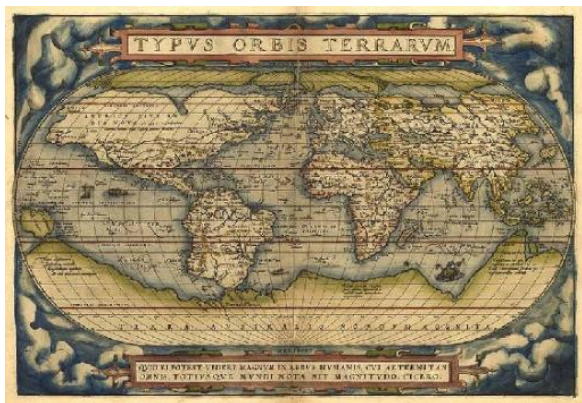
3. Az univerzumot irányító törvények

A világ feltérképezése és a fizika törvényeinek megfigyeltése

A fizikusok a 17. századtól folyamatosan azon fáradoznak, hogy megfigyeljék azokat a fizikai törvényeket, amelyek univerzumunkat formálják és irányítják. Hasonlóan ahhoz, ahogyan az európai felfedezők megrajzolták a Föld térképét.

1506-ra Eurázsia mellett voltak már Dél-Amerika létezésére utaló jelek is. 1570-re a két Amerika került az érdeklődés középpontjába, de nem tudtak még Ausztráliáról. 1744-re már intenzíven zajlott Ausztrália feltérképezése, és az Antarktiszt lett az „ismeretlen föld” (terra incognita).

Ezzel szinte analóg módon 1690-re a fizikát Newton törvényei határozták meg. Az erő, a tömeg, a gyorsulás és az azokat összekapcsoló egyenletek, például az $F = ma$ koncepcióján alapuló newtoni törvények pontosan leírták a Hold Föld körüli és a Föld Nap körüli keringését, egy repülőgép mozgását, egy híd felépítését, és a gyerekek üveggolyóinak ütközéseit. A 2. fejezetben már találkoztunk a newtoni törvények egy példájával, a gravitáció inverz négyzetes törvényével.



3.1. ábra

Világtérképek 1506-tól 1744-ig

1506—Martin Waldseemüller

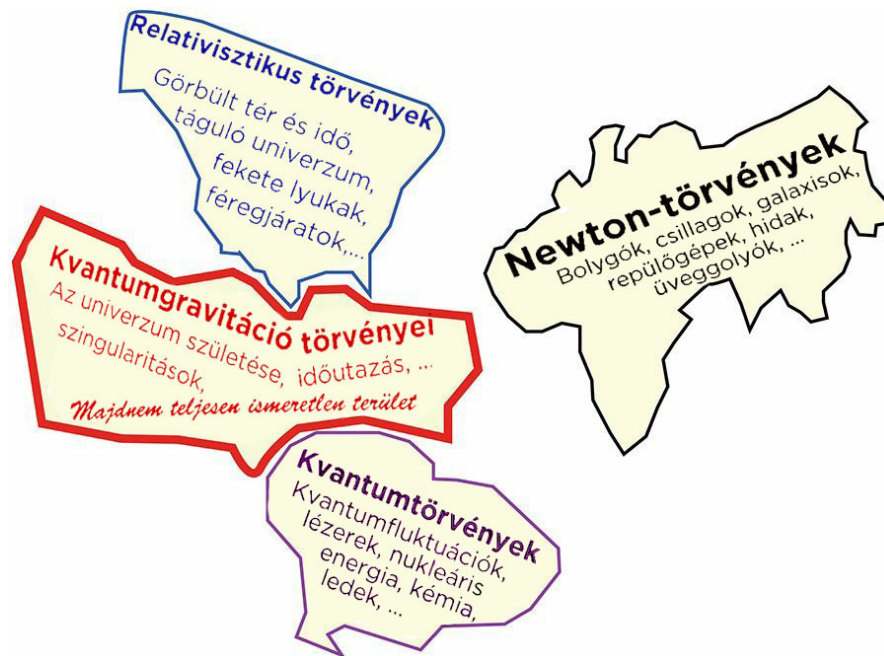
1570—Abraham Ortelius

1744—Emanuel Bowen



1915-re Einstein és mások szilárd bizonyítékokat találtak arra, hogy a Newton-törvények nem érvényesek a nagyon gyors (közel fénysebességgel

mozgó), a nagyon nagy (az univerzum mint egész) és a nagyon erős gravitációjú világban (például fekete lyukaknál). Az eltérések korrigálására Einstein forradalmian új elgondolásokat vezetett be, a *fizika relativisztikus törvényeit* (3.2. ábra). A görbült idő és a görbült tér koncepcióját felhasználva (amit a következő fejezetben fogok bemutatni) a relativisztikus törvények előre jelezték, és meg is magyarázták az univerzum tágulását, a fekete lyukakat, a neutroncsillagokat és a féregjáratokat.



3.2. ábra

Az univerzumot irányító fizikai törvények.

1924-re az is teljesen világossá vált, hogy a newtoni törvények a nagyon kicsi dolgok (molekulák, atomok és elemi részecskék) birodalmában is csődöt mondanak. Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger és mások a kvantumfizika törvényeinek megalkotásával válaszoltak erre a problémára. A kvantumtörvények - amelyek azon a koncepción alapulnak, miszerint véletlenszerűen minden fluktuál (ingadozik) legalább egy kicsit (erről a 26. fejezetben írok részletesebben), ezek a fluktuációk pedig új részecskéket és sugárzást hozhatnak létre ott is, ahol addig azok nem voltak - vezettek a lézerek megalkotásához, a nukleáris energiához, a fénykibocsátó diódákhoz és a kémiai folyamatok megértéséhez.

1957-re azonban az is egyértelmű lett, hogy a relativisztikus törvények és a kvantumtörvények alapjaikban nem egyeztethetők össze egymással. Különböző, egymásnak ellentmondó dolgokat jeleznek előre olyan körülmények között, amikor a gravitáció nagyon erős és a fluktuációk is

nagyok⁹. Ilyenek a viszonyok az univerzum születésekor, az ősrobbanás során (2. fejezet), a Gargantuához hasonló fekete lyukak magjában (26. és 28. fejezet) és az időben visszafelé történő utazáskor (30. fejezet). Ezekben a tartományokban az inkompatibilis relativisztikus és kvantumtörvények „szenvedélyes házasságából” a *kvantumgravitáció* új törvényei születnek.¹⁰

A kvantumgravitáció törvényeit még nem ismerjük, van azonban néhány impozáns elgondolásunk, például a szuperhúrelmélet (21. fejezet), köszönhetően a 21. század legkiemelkedőbb fizikusai roppant erőfeszítéseinek. Ennek ellenére a kvantumgravitáció egyelőre még majdnem teljesen ismeretlen terület. Ez pedig óriási mozgásteret hagy a sci-fi számára, amely mozgásteret Christopher Nolan nagy leleménnyel ki is használ a *Csillagok között*-ben (28-31. fejezet).

Igazság, megalapozott feltételezések és spekulációk

A *Csillagok között* fizikája négy területet ölel fel: a newtoni és a relativisztikus fizikát, a kvantumfizikát és a kvantumgravitációt. Ennek megfelelően egyes részei biztosan igazak, mások megalapozott feltételezések, és természetesen vannak spekulációk is.

Ahhoz, hogy igaz legyen, egy tudományos állításnak jól megalapozott fizikai (newtoni, relativisztikus vagy kvantumfizikai) törvényeken kell nyugodnia, és elegendő megfigyelési ténynek kell alátámasztania ahhoz, hogy biztosak legyünk abban, hogyan kell alkalmazni a jól megalapozott törvényeket.

⁹ (Ilyen tartományokban például a fény energiájának vannak nagy kvantumfluktuációi. Olyan nagyok, hogy véletlenszerűen és nagymértékben meggörbítik a teret és az időt is. A fluktuáló görbület az Einstein-féle relativisztikus törvények hatókörén kívül esik, a görbület fényre gyakorolt hatásával pedig a kvantum sugárzási törvények nem tudtak mit kezdeni.)

¹⁰ A „szenvedélyes házasság” kifejezést mesterem, John Wheeler alkotta, aki remekül értett a dolgok elnevezéséhez. Neki köszönhetjük a „fekete lyuk” és a „féregjárat” kifejezéseket is, illetve azt a mondást, hogy „a fekete lyuknak nincs haja” (14. és 5. fejezet). Egyszer elmesélte nekem a módszerét: gondolatait szabadon engedve órákon keresztül ül egy kád forró vízben, míg rá nem talál a helyes szóra vagy kifejezésre.)



3.3. ábra

Csillagok a Gargantua galaxisában, ahogyan a Gargantua árnyéka körül látszanak. A Gargantua a csillagokról érkező fénysugarakat elhajlítja, teljesen eltorzítva így galaxisának a megjelenését: „gravitációs lencsési” a galaxist [A Double Negative vizuális effektusokért felelős csapata által a könyv számára készített szimulációból]

Ebben az értelemben a neutroncsillagokra és a 2. fejezetben leírt mágneses terükre tett állítások igazak. Miért? Először is, a neutron-csillagok létét mind a kvantum-, mind a relativisztikus törvények határozottan jelzik. Másodszor, a csillagászok részletekbe menően tanulmányozták a neutroncsillagok (pulzárok) sugárzását (a 2. fejezetben leírt pulzusokat a látható, röntgen- és rádiótartományban). Ezek a megfigyelések gyönyörűen és pontosan magyarázhatók a kvantumfizika és a relativitáselmélet törvényeivel, ha a pulzárt forgó neutroncsillagnak tekintjük, más magyarázat pedig eddig még nem látott napvilágot. Harmadszor, az elméletek szerint a neutroncsillagok szupernóva-robbanások eredményeként jönnek létre, a pulzárok pedig nagy, táguló gázfelhők, szupernóva-maradványok centrumaiban találhatók. Így nekünk, asztrofizikusoknak nincs kétségünk, hogy a neutroncsillagok valóban léteznek, és valóban az észlelt pulzársugárzást produkálják.

Másik példa az igazságra a Gargantua fekete lyuk és a fény elhajlítása, amelynek során eltorzítja a csillagok képét (3.3. ábra). Ezt a torzítást a fizikusok „gravitációs lencsésítésnek” nevezik, mivel nagyon hasonló ahhoz, ahogyan például az optikai lencsék és a "görbe tükrök" torzítják a képet a vidámpark elvarázsolt kastélyában.



3.4. ábra

Égő penészes kukorica (A Csillagok között-ből a Warner Bros Entertainment Inc. engedélyével)

Einstein relativisztikus törvényei egyértelműen leírják a feketelyukak minden tulajdonságát a felszínüktől kifelé haladva, beleértve a gravitációs lencsézést is¹¹. A csillagászok megfigyelési bizonyítékokat is szolgáltatottak létezésükre, a Gargantuához hasonló gigantikus fekete lyukakéra is. Bár gravitációs lencsézésüket még nem sikerült észlelni, más objektumokét igen, és a megfigyelt lencsézés pontosan megfelel az einsteini relativisztikus törvények által előre jelzett képnek. Ez pedig tökéletesen elegendő számomra. A Gargantua gravitációs lencsézése, ahogyan azt Paul Franklin Double Negative-csoportja szimulálta az általam szolgáltatott relativisztikus egyenletek alapján, igaz. Pontosan így nézne ki a valóságban is.

Ezzel szemben a növényvész, ami a *Csillagok között-ben* az egész emberi fajt veszélyeztette, bizonyos értelemben megalapozott feltételezés, más értelemben viszont spekuláció. Megmagyarázom.

Írott történelme során az emberiség által termesztett növényeket időről időre megtámadták mikrobák által okozott, gyorsan terjedő fertőző betegségek. Ezek biológiája a kémián, az viszont a kvantumtörvényeken alapszik. A tudósok egyelőre még nem tudják a kémia összes törvényszerűségét a kvantumfizika törvényeire visszavezetni (bár nagy részüket igen), és főleg nem tudják ezt a biológia és a kémia viszonylatában. A megfigyelésekből és kísérletekből azonban a biológusok sok mindent tudnak a fertőzésekről. Azok a fertőző betegségek, amelyekkel az emberiség eddig találkozott, nem terjedtek olyan gyorsan egyik növényfajról a másikra, hogy az az emberi fajt is veszélyeztette volna. De semmi sem garantálja, hogy ez a jövőben sem történhet meg. Az tehát, hogy ilyen fertőzés lehetséges, *megalapozott feltételezés*. Az, hogy egy nap meg is történik, *spekuláció*, amit a legtöbb biológus nem tart nagyon valószínűnek.

¹¹ 5., 6., és 8., fejezet.

A *Csillagok között*-ben megjelenő gravitációs anomáliák (24. és 25. fejezet), például az, amikor a Cooper által feldobott pénzérme hirtelen a padlóra esik, *spekulációk*. Ugyancsak spekuláció az az elképzelés, hogy az anomáliák segítségével kolóniákat lehetne kitelepíteni a Földről (31. fejezet).

Bár a gravitációval foglalkozó kísérleti fizikusok kitartóan keresték azokat az eltéréseket, amelyek nem magyarázhatók a newtoni és a relativisztikus törvényekkel, egyetlen meggyőző gravitációs anomáliát sem sikerült detektálni a Földön.

A kvantumgravitáció megértését célzó erőfeszítések eredményeként valószínűnek tűnik, hogy az univerzumunk egy membrán (fizikusoknak egyszerűen csak „brán”), amely egy magasabb dimenziós „hipertérbe” ágyazódik, amit a fizikusok angolul „bulk”-nak neveztek el¹². (3.5. ábra) Amikor az Einstein-féle relativitáselmélet egyenleteit alkalmazzák erre a befoglaló térre, amint azt Brand professzor is teszi irodájának tábláin, felfedezik a gravitációs anomáliák lehetőségét - az anomáliákat amelyeket a hipertér fizikai mezői idéznek elő.

Korántsem vagyunk biztosak abban, hogy a befoglaló tér valóban létezik. Az is csupán megalapozott feltételezés, hogy ha létezik, akkor az Einstein-féle törvények uralják. Nincs sejtésünk arra vonatkozóan sem, hogy ha létezik, vajon a hipertér bír-e olyan mezőkkel, amelyek gravitációs anomáliákat generálhatnak, és ha igen, akkor ezek felhasználhatók-e. Az anomáliák léte és kihasználhatóságuk meglehetősen szélsőséges spekuláció. De olyan, tudományos alapokon nyugvó spekuláció, amellyel én és néhány fizikustársam élvezettel foglalkozunk - ha máskor nem, késő esti sörözgetés közben. Így beleillenek azon irányelvek közé, amelyeket a *Csillagok közöli* számára javasoltam: „A spekulációk ... valódi tudományos alappal bírnak, olyan ötletekből születtek, amelyeket legalább néhány "tekintélyes" tudós lehetségesnek tart” (1. fejezet).

A könyvben, amikor a *Csillagok között* tudományos háttérét tárgyalom, mindig jelezni fogom annak státuszát - igazság, megalapozott feltételezés, spekuláció - is, a fejezet vagy rész elején egy szimbólummal:



- igazság



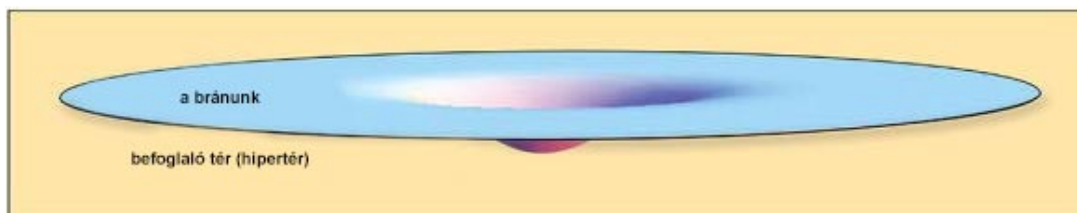
- megalapozott feltételezés



- spekuláció

¹² (A bulk kifejezésre - egyéb magyar megfelelője nem lévén - a továbbiakban a befoglaló tér és a hipertér kifejezéseket fogjuk használni, előbbi főleg akkor, amikor geometriai értelemben hivatkozunk rá, utóbbit pedig egyéb esetekben.)

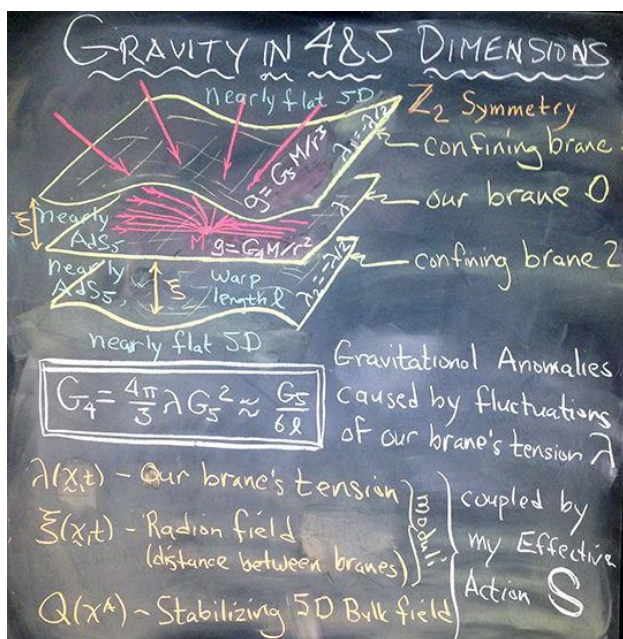
Természetesen egy elképzelés besorolása - igazság, megalapozott feltételezés, spekuláció - változhat, és ilyen változással a filmben és a könyvben is találkozhatunk. Cooper számára a befoglaló tér megalapozott sejtés, ami igazsággá válik, amikor odaér a hiperkockához (29. fejezet), a kvantumgravitáció törvényei pedig spekulációk egészen addig, amíg TARS meg nem szerzi



3.5. ábra

Univerzumunk a Nap szomszédságában kétdimenziós felületként vagy óránként ábrázolva, egy háromdimenziós befoglaló térbe ágyazódva. A valóságban bránunknak három térdimenziója van, a befoglaló térnek pedig négy. Az ábrát tovább magyarázzuk a 4. fejezetben, lásd még a 4.4. ábrát

azokat a fekete lyuk belsejéből, így Cooper és Murph számára igazsággá léptek elő (28. és 30. fejezet).



3.6. ábra

A gravitációs anomáliák lehetséges alapjait leíró relativisztikus egyenletek Brand professzor tábláján. A részletekért lásd a 25. fejezetet

A 19. századi fizikusok számára a Newton-féle inverz négyzetes gravitációs törvény megkérdőjelezhetetlen abszolút igazság volt. 1890 körül azonban forradalmi módon ütötte ki a nyeregből egy kicsiny anomália, amelyet a Merkúr Nap körüli pályájában észleltek (24.

fejezet). Newton törvénye majdnem teljesen pontos az egész Naprendszerben, de csak majdnem. Ez az eltérés is segített kikövezni az utat Einstein 20. századi relativisztikus törvényeihez, amelyek - az erős gravitációs terek esetében - spekulációként kezdték, majd megalapozott feltételezésekké váltak, amikor elkezdtek gyűlni az észlelési adatok, mígnem 1980-ra az egyre pontosabbá váló megfigyelések eredményeként igazsággá nemesedtek (4. fejezet).

A korábbi tudományos igazságokat felülíró forradalmak rendkívül ritkák. De amikor bekövetkeznek, fenekestül felforgathatják a tudományt és a technológiát is.

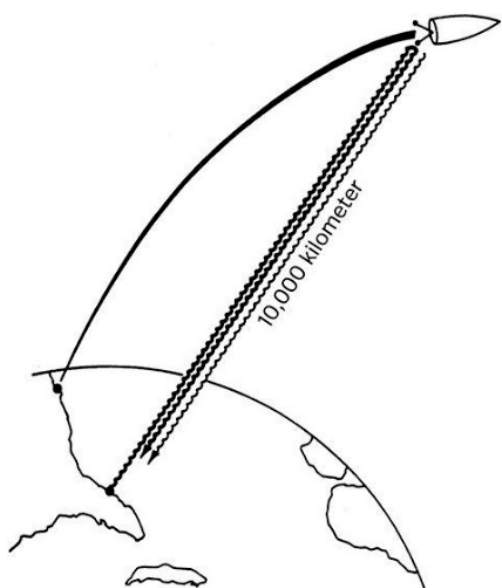
Fel tudunk-e idézni a saját életünkből olyan spekulációkat, amelyek megalapozott feltételezésekké, majd igazsággá váltak? Megéltük-e valaha, hogy biztos alapokon nyugvónak hitt igazságaink alól forradalmi változások egyszer csak kirántották a szőnyeget?

4. Görbült idő, görbült tér és az árapályerők



Einstein törvénye az idő görbüléséről

Einstein 1907-től kisebb-nagyobb megszakításokkal folyamatosan dolgozott a gravitáció megértésén. 1912-ben aztán egy briliáns ötlete támadt. Rájött, Hogy az időnek is görbülnie kell olyan nagy tömegű testek mellett, mint például a Föld vagy egy fekete lyuk, és ez felelős a gravitációért. Az általa megfogalmazott felismerést szeretem „Einstein időgörbültre vonatkozó törvénye”-ként idézni, a pontos matematikai formula¹³ kvalitatív lényege a következő: *Minden ott szeret létezni, ahol a leglassabban öregszik, és a gravitáció is ide tereli*¹⁴.



4.1. ábra

Atomórák mérik a földi idő lassulását. [Reproducio: *Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test*, by Clifford M. Will (Basic Books, 1993)]

Minél jobban lassul az idő, annál erősebb a gravitáció. A Földön, ahol ez a lassulás naponta csak néhány mikroszekundum, a gravitációs vonzás közepes. Egy neutroncsillag felszínén, ahol a lassulás naponta már a néhány órát is eléri, a gravitáció óriási. Egy fekete lyuk felszínén pedig az idő meg is áll, a gravitációs vonzás olyan nagy hogy semmi, még a fény sem képes elszökni onnan.

A fekete lyuk közelében lelassuló idő fontos szerepet játszik a *Csillagok között*-ben is. Cooper lemondott arról, hogy valaha is újra láthassa a lányát, Murphöt, amikor a Gargantua közelében elhaladva ő csak néhány órát öregedett, miközben Murph a Földön nyolc évtizedet.

Felismerése után közel fél évszázadig a technológiánk nem volt elég jó ahhoz, hogy kísérletileg is ki tudjuk mutatni az Einstein-törvény által megjósolt

lassulást. Az első eredményes tesztre 1959-ig kellett várni, amikor Bob Pound és Glen Rebka a Mössbauer-effektust felhasználva kimérte, hogy mennyivel múlik lassabban az idő a Harvard Egyetem 22 méter magas tornyának alagsora és tetőtere között. Kísérletük rendkívül pontos

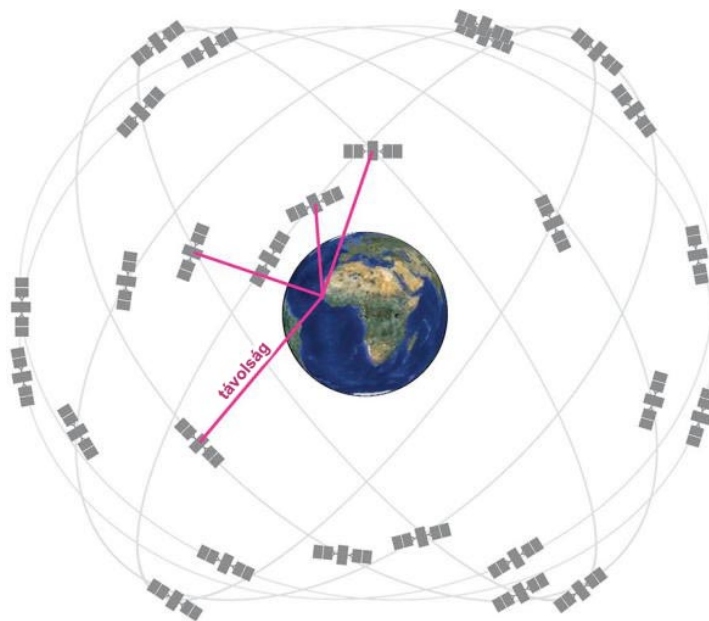
¹³ lásd a *Néhány szakmai megjegyzés* című részt a könyv végén.

¹⁴ Némileg előreugorva, a furcsának ható időgörbület fogalom magyarázata: Az időt akkor mondjuk görbültnek - az elnevezés a térgörbület analógiája ha eltérő pontokban különbözőképpen telik.

volt: napi 0,0000000000016 másodperc (1,6 billiomod másodperc) eltérést is ki tudtak volna mutatni. Az eltérés azonban ezen érték 130-szorosának adódott, jó egyezésben az Einstein által jósolttal: Az idő naponta 210 billiomod másodperccel lassabban telik az alagsorban, mint a tetőtérben.

A pontosság 1976-ban még tovább javult, amikor a harvardi Robert Vessot egy atomórát küldött a NASA egyik rakétájával 10 000 kilométer magasságba, és annak járását rádiójelek segítségével hasonlította össze a földi referenciaórákéval. Vessot úgy találta, hogy a földfelszínen az idő naponta 30 mikroszekundummal (0,00003 másodperc) lassabban múlik, mint 10 000 kilométer magasságban, az eredmény pedig hibahatáron belül megegyezik az Einstein-féle törvény által jelzett értékkel. A Vessot-féle mérés pontossága (bizonytalansága) a 30 mikroszekundum 7 százzezred része (0,00007) volt.

A globális helymeghatározó rendszer (GPS), amelynek segítségével okostelefonunkkal akár 10 méteres pontossággal is megmondhatjuk, hol vagyunk, egy 20 000 kilométer magasságban keringő, 27 műholdból álló rendszer rádiójeleivel működik.



4. 2. ábra

A globális helymeghatározó rendszer

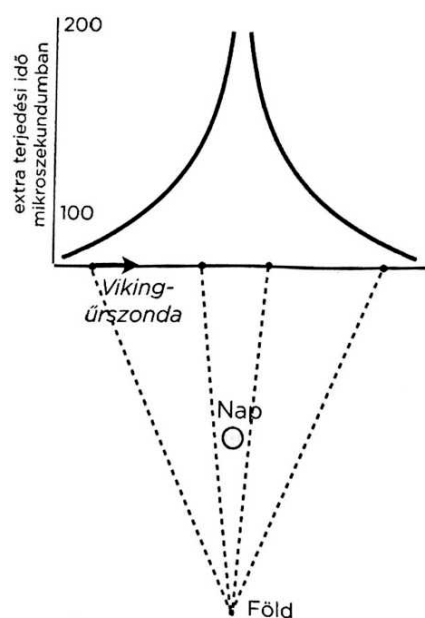
A Föld egy adott helyéről általában csak 4-12 hold látható egyszerre. Mindegyik észlelhető műhold rádiójelében kódolva van a pozíciója és a jel kibocsátásának ideje. Az okostelefon a jel beérkezési idejét méri, összeveti a kibocsátás idejével, és ez alapján számolja ki, hogy az mekkora utat tett meg, azaz mekkora a távolság a hold és közte. Néhány műhold pozícióját és távolságát ismerve az eszközön futó alkalmazás háromszögeléssel határozza meg a telefon helyzetét.

Ez az eljárás azonban hibás eredményt adna, ha a jel átviteli idejét a műholdak valódi fedélzeti idejéből számolnák. 20 000 kilométer magasságban az idő naponta 40 mikroszekundummal gyorsabban telik, mint a földfelszínen, ezt egy korrekcióval figyelembe kell venni. A saját óráikkal mért időadatokat a rádiójelek kibocsátása előtt „le kell lassítani” a Föld felszínén folyó idő ütemére.

Einstein zseni volt. Talán a valaha élt legnagyobb tudós. Az előbbi példa csak egy a sok közül arra, amikor a fizikai törvényekkel kapcsolatos éles meglátásait életében nem sikerült kísérletileg is igazolni. Fél évszázad technikai fejlődése kellett a szükséges pontosság eléréséhez és még további fél évszázad a jelenség mindennapi fel-használásához. További hasonló példa a lézer, a nukleáris energia és a kvantumkriptográfia.

A tér görbülése: A befoglaló tér és a bránunk

1912-ben Einstein felismerte, hogy ha a nagy tömegű testek meggörbítik az időt, akkor a térrel is ugyanennek kell történnie. Annak ellenére, hogy ez volt élete legintenzívebb alkotó szakasza, a görbült tér teljes leírása sokáig nem sikerült. 1912 és 1915 között minden erejét megfeszítve dolgozott. Végül 1915 novemberében jött el a heurékapillanat, és sikerült felírnia az „általános relativitáselmélet téregyenleteit”, amelyek tartalmazták összes relativisztikus törvényét, beleértve a görbült térre vonatkozót is.



A technológiai lehetőségek azonban ismét nem voltak elegendőek a nagy pontosságú tesztek kivitelezésére.¹⁵ A szükséges fejlesztésekhez ezúttal hatvan év kellett, a folyamat pedig néhány kulcsfontosságú kísérletben csúcsosodott ki. Az általam leginkább kedvelt kísérletet Robert Reasenberget és Irwin Shapiro vezette a Harvardon. 1976-77-ben rádiójeleket küldtek a Mars körül keringő két űrszondának. A Viking-1 és Viking-2 szondák felerősítették a jelet, és visszasugározták a Földre, ahol mérték az oda-vissza út idejét. A Föld és a Mars

Nap körüli keringése miatt a rádiójelek által bejárt utak különbözőek voltak. Először a trajektóriák a Naptól

4.3. ábra

A rádiójelek utazási ideje a Földtől a Viking-űrszondáig és vissza

¹⁵ Lásd azonban a 24. fejezet első részét

távolabb húzódtak, majd annak közelében, végül újra távolabb a Naptól, ahogyan az a 4.3. ábra alsó részén látható.

Ha a tér „sík” (értsd euklideszi) lenne, az oda-vissza út ideje lassan és egyenletesen változna. Azonban nem ez történt. Amikor a rádióhullámok a Nap közelében haladtak el, terjedési idejük több száz mikroszekundummal hosszabb volt a vártnál. Ezt az extra időt mutatja a 4.3. ábra felső része az űreszköz pozíciójának függvényében: egy hirtelen felfutás után újra csökkenés következik. Einstein egyik relativisztikus törvénye szerint a rádióhullámok és a fény terjedési sebessége abszolút természeti állandó¹⁶. Ezért a Föld és az űreszköz közötti távolságnak nagyobbnak kell lennie a vártnál, ha a jel a Nap mellett halad el, mégpedig a néhány száz mikroszekundum és a fénysebesség szorzatának megfelelő körülbelül 50 kilométerrel.

A hossznövekedés nem léphetne fel, ha a tér sík lenne, mint egy papírlap. A tér Nap általi meggörbítése okozza. Az időképleletéből és annak az űreszköz Földhöz viszonyított mozgása miatti változásából Reasenberg és Shapiro meghatározta a térgörbület alakját. Fontosabban meghatározták a Viking-rádiójelek trajektóriái által kifeszített kétdimenziós felület alakját. Ez a felület majdnem egybeesett a Nap egyenlítői síkjával, ezért a leírásban ezt használom.

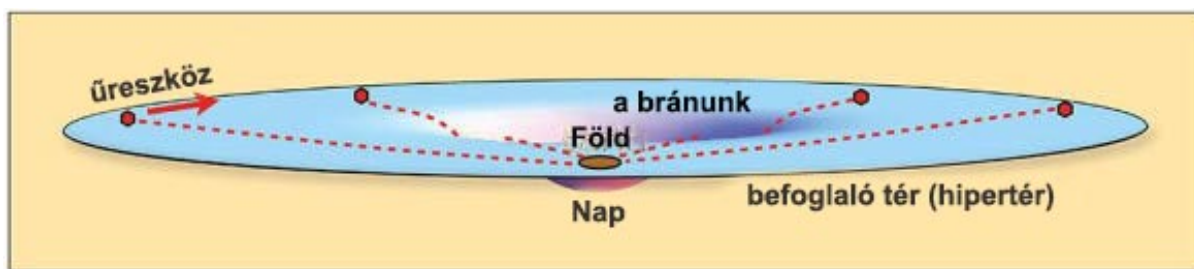
A csoport által a Nap egyenlítői síkjára meghatározott alakot a 4.4. ábra mutatja, a görbület mértékét erősen eltúlozva. A mért alak a valódi görbület 0,001 részének megfelelő hibahatáron belül megegyezett az einsteini törvények által jósolttal. Egy neutroncsillag körül a térgörbület jóval nagyobb ennél. Fekete lyuk esetében pedig roppant nagy.

A Nap egyenlítői síkja két egyforma félre osztja a teret, egyik a sík felett, a másik alatta helyezkedik el. Mindazonáltal a 4.4. ábra az egyenlítői síkot egy tányérhoz hasonlóan görbültnek mutatja. Belül és a Nap közelében lefelé hajlik, így a Nap körüli körök π -vel (3,14159...) szorzott átmérője nagyobb, mint a kerületük, a különbség a Nap esetében körülbelül 100 kilométer. Ez nem tűnik túl soknak, de az űreszközök segítségével könnyen mérhető volt, mégpedig egyezredes pontossággal.

Hogyan tud a tér „lehajlani”? Egyáltalán *miben* hajlik? A „befoglaló térnek” nevezett magasabb dimenziós hipertérben hajlik, ami nem is része az univerzumunknak!

Fogalmazzuk meg ezt pontosabban! A 4.4. ábrán a Nap egyenlítői síkja egy kétdimenziós felület, amely egy háromdimenziós befoglaló térben hajlik lefelé.

¹⁶ Állandó a bolygóközi tér elektronjaival való kölcsönhatás miatt szükséges kicsiny lassítás, az ún. „plazmakorrekció” figyelembevétele után.



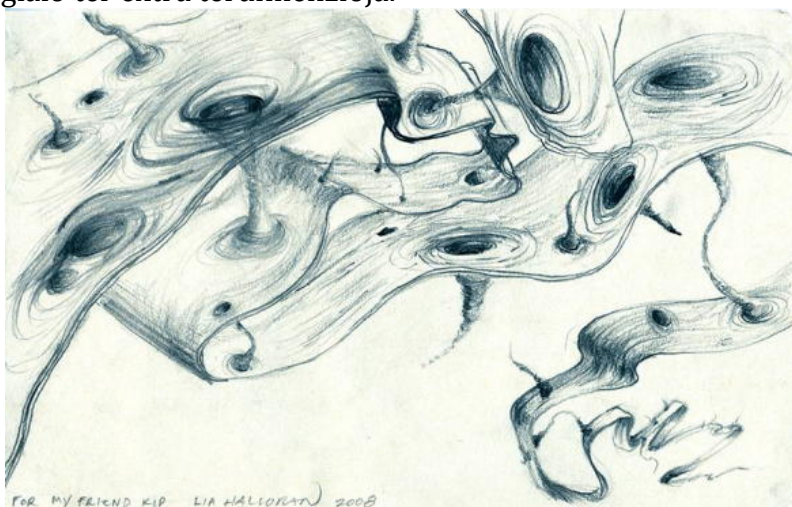
4.4. ábra

A Viking rádiójeleinek útja a Nap görbült egyenlítői síkjában

Hasonló módon gondolkodunk mi fizikusok az egész univerzumunkról is. Világegyetemünknek három térdimenziója van (előre-hátra, jobbra-balra, fel-le), és úgy gondolunk rá, mint egy háromdimenziós membránra vagy a rövidség kedvéért bránra, amely egy magasabb dimenzió befoglaló térhben göbül. Na de hány dimenziója van a befoglaló térnek? Ezt a 21. fejezetben tárgyalom részletesen, itt csak megjegyzem, hogy a *Csillag között* céljaira elegendő volt egy plusz térdimenzió, azaz összesen négy térdimenzió.

Emberi elmével nagyon nehéz elképzelni a négydimenziós befoglaló térbe ágyazott és abban görbülő háromdimenziós univerzumunkat, a teljes bránunkat. Ezért a könyvben bránunkat és befoglaló terét a dimenziószámukat eggyel csökkentve ábrázolom, ahogyan a 4.4. ábrán is tettem.

A *Csillagok között-ben* a szereplők gyakran beszélnek öt dimenzióról. Ebből három térdimenzió a saját univerzumunké (előre-hátra, jobbra-balra, fel-le). A negyedik az idő, az ötödik pedig a befoglaló tér extra térdimenziója.



4.5. ábra

Bránunkból a befoglaló térbe nyúló fekete lyukak és a befoglaló tér részeit összekötő féregjáratok. Mind a bránból, mind a befoglaló térből egy térdimenziót elhagytunk

[Lia Halloran rajza]

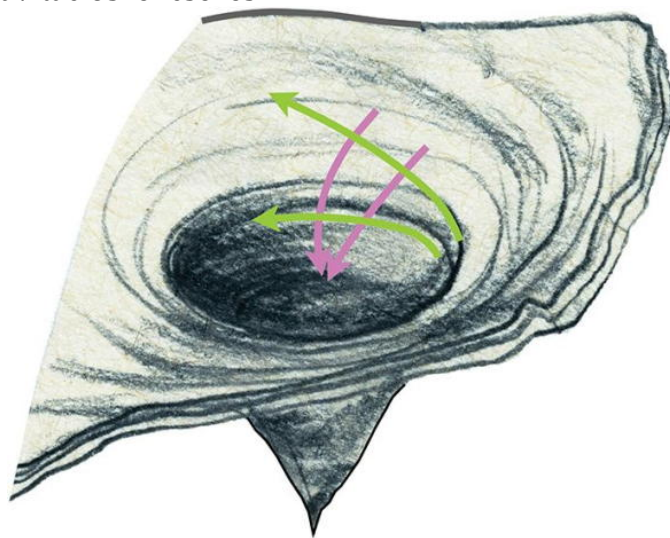
Létezik ez a befoglaló tér? Tényleg van ötödik dimenzió, vagy esetleg még több is, amelyekkel az emberi faj még soha nem találkozott? Nagyon valószínű, hogy igen. Ezt a 21. fejezetben fogjuk vizsgálni.

A tér, a bránunk görbülése nagyon fontos szereppel bír a *Csillagok között*-ben. Döntő szerepet játszik például annak a féregjáratnak a létezésében, amely Naprendszerünket köti össze az univerzum távoli részével, ahol a Gargantua fekete lyuk található. Továbbá eltorzítja a látómezőt a féregjárat és a Gargantua körül, ez a gravitációs lencsésítés.

A 4.5. ábra egy extrém példa a térgörbületekre. Lia Halloran grafikusművész barátom szürreális amely univerzumunk egy hipotetikus, féregjáratokat (14. fejezet) és fekete lyukakat (5. fejezet) nagy számban tartalmazó régióját ábrázolja, beágyazva bránunkat a befoglaló térbe.

A fekete lyukak piciny pontokban végződnek, ezek az ún. „szingularitások”. A féregjáratok a brán egyik részét kötik össze egy másikkal. A megegyezésnek megfelelően az egyiket elhagyom

a brán három dimenziójából, így az úgy néz ki, mint egy kétdimenziós felület.



rajza,

4.6. ábra

Négy bolygópálya egy fekete lyuk szomszédságában. A lyuk képe Lia Halloran 4.5. ábrán látható rajzának részlete

Árapályerők

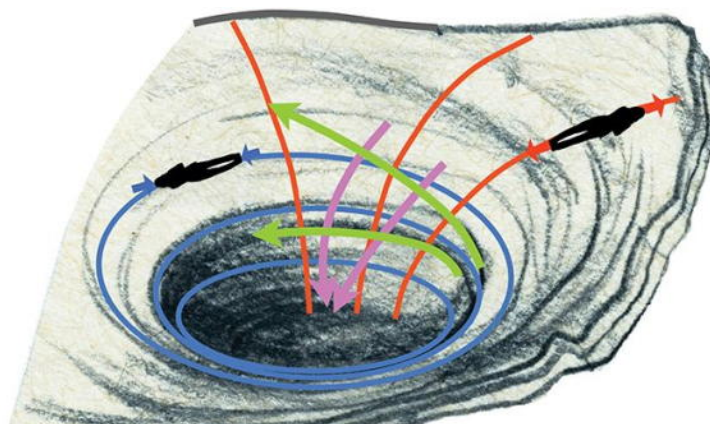
Az Einstein-féle relativisztikus törvényeknek megfelelően a bolygók, csillagok és a hajtóműveket nem használó űreszközök egy fekete lyuk közelében a lyuk által meggömbített tér és idő által megengedett legrövidebb pályákon haladnak. A 4.6. ábra négy ilyen pályára mutat példát. A fekete lyukba tartó két bíbor színű trajektória egymással párhuzamosan indul. Mivel minden pálya egyenes igyekszik maradni, a két trajektória közeledik egymáshoz. A tér és az idő görbülése tereli egymás felé őket. A fekete lyuk kerülete mentén haladó zöld pályák szintén párhuzamosan indulnak.

A görbület azonban ez esetben távolítja egymástól azokat.

Néhány évvel ezelőtt egyik tanítványommal ezeket a bolygópályákat új nézőpontból vizsgáltuk meg. Az Einstein-féle relativitáselméletben van egy nagyon fontos matematikai objektum, a Riemann-tenzor. Ez írja le a tér és az idő görbülését. A Riemann-tenzor matematikájában

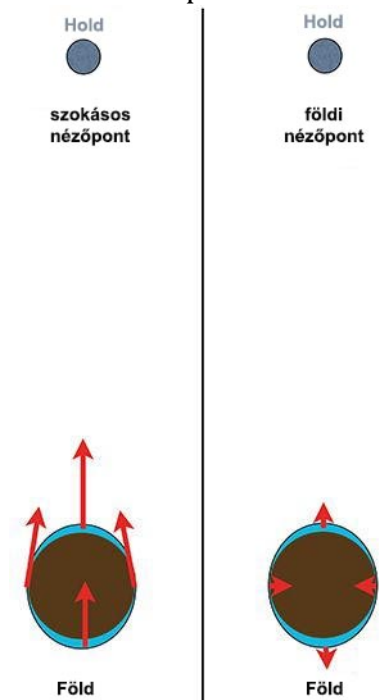
rábukkantunk olyan rejtett erővonalakra, amelyek bizonyos bolygópályákat egymás felé nyomnak, míg másokat távolítanak egymástól. Tanítványom, David Nichols „tendex-vonalaknak” nevezte el ezeket a latin tendere szó után, amelynek jelentése „feszíteni”, „nyújtani”.

A 4.7. ábra több ilyen vonalat mutat a 4.6. ábra fekete lyuka körül. A zöld pályák a kezdetüknél párhuzamosak, majd a vörös színű tendex-vonalak távolítják őket egymástól. Az



4.7. ábra

Tendex-vonalak egy fekete lyuk körül. A lyuk képe Lia Halloran 4.5. ábrán látható rajzának részlete



4.8. ábra

Newton magyarázata a dagály és apály kialakulására a földi óceánokban

egyik vörös tendex-vonalra egy fekvő női figurát is rajzoltam. A tendex-vonal őt is nyújtja: a feje és a lábai között a vörös tendex-vonal által okozott feszítőerőt érzékel.

A bíbor színű pályák felső végüknél szintén párhuzamosan futnak, majd a kék tendex-vonalak egymás felé kényszerítik őket, ennek eredményeként pedig az azok mentén fekvő női figura is összenyomódik.

Ez a feszítés és összepréselés igazából csak egy más módja a tér és az idő görbülése által okozott hatások leírásának. Egyik nézőpontból a trajektóriák azért távolodnak egymástól vagy közelednek egymáshoz, mert a görbült tér és idő által megengedett legrövidebb utakat követik. A másik nézőpontból a feszülést és az összenyomódást a tendex-vonalak okozzák. Ezért azoknak szintén a tér és idő görbülését kell reprezentálniuk. Valóban így is van, ahogyan azt a Riemann-tenzor matematikája felfedte előttünk.

Nem a fekete lyukak az egyedüli objektumok, amelyek feszítő és összenyomó erőket generálnak. A csillagok, bolygók és a

holdak is okoznak ilyen hatásokat. 1687-ben Isaac Newton a gravitációról szóló elméletében fel is ismerte ezt, és az óceánok árapályjelenségeinek magyarázatára használta.

Newton gondolatmenete szerint a Földnek a Hold felé forduló oldalára kísérőnk erősebb gravitációs vonzást gyakorol, mint az ellentétes féltekére. A Holdról nézve a Föld jobb és bal oldali részére pedig kissé eltérő irányú erők hatnak, mivel mindegyik a Hold középpontja felé mutat. A szituációt mutató szokásos kép a 4.8. ábrán látható.

A Föld nem érzékeli a gravitációs vonzóerők átlagát, mivel pályája mentén mozogva szabadon esik.¹⁷ (Hasonlóan ahhoz, ahogyan az *Endurance* legénysége sem érezte a Gargantua gravitációját, amikor az *Endurance*-ben parkoló pályán a Fekete lyuk körül keringtek. Csak az *Endurance* forgása miatti centrifugális erőt érzékelték.) A Föld csak a Hold által kifejtett, a 4.8. ábrán vörös nyilakkal jelzett, az átlagukról már megszabadított erőket érzékeli, amelyek a Hold irányába eső egyenes mentén feszítik, arra merőlegesen pedig összenyomják a bolygót. Kvalitatíven ugyanez történik a fekete lyuk körül is (4.7. ábra).

Ezek az erők a Hold felé eső és az azzal ellentétes oldalon megemelik az óceánok vizét, dagályt okozva ezzel. A Hold irányára merőlegesen pedig a felszín felé nyomják a vizeket, apályt létrehozva ott. Amint a Föld 24 óra alatt egyszer teljesen körbefordul a tengelye körül, két dagályt és két apályt tapasztalhatunk. Newton nagy vonalakban így magyarázta tehát a dagály és az apály létrejöttét, eltekintve attól a csekély problémától, hogy a Nap gravitációs árapályereje szintén hozzájárul a dagály és apály kialakulásához. Feszítő-összenyomó ereje hozzáadódik a Holdéhoz.

Az óceánok dagályjelenségeinek kialakulásában betöltött szerepük miatt ezeket a gravitációs feszítő és összenyomó erőket - amelyeket a Föld valójában érzékel - árapályerőknek hívjuk. A gravitáció newtoni törvénye alapján kiszámolt árapályerők nagyon nagy pontossággal megegyeznek az einsteini relativisztikus törvények alapján meghatározott erőkkel. Meg kell



4.9. ábra

Az árapály relativisztikus nézőpontból:
ebben a leírásban a Hold tendex-vonalai
okozzák a jelenséget

¹⁷ Einstein 1907-ben jött rá arra, hogy ha leesne mondjuk a házának tetejéről, akkor esés közben nem érezné a gravitációt. Ezt „élete legboldogabb gondolatának” nevezte, mivel ennek hatására kezdett el foglalkozni a gravitáció magyarázatával, ami végül is elvezette a görbült tér és idő koncepciójához és az azt leíró törvényekhez.

egyezniük, hiszen a relativisztikus törvények és a Newton-törvények ugyanazt mondják, ha gyenge gravitációs térről van szó, és az előforduló sebességek sokkal kisebbek a fényénél.

A Hold által okozott dagály és apály relativisztikus leírásában (4.9. ábra) az árapályerőket a Földet oldalirányban összenyomó kék és a Hold irányában szétfeszítő vörös tendex-vonalak okozzák. Pontosan úgy, mint a fekete lyuk esetében (4.7. ábra). A Hold tendex-vonalai a kísérőnk körüli görbült tér és idő vizuális megtestesülései. Figyelemre méltó, hogy ilyen kicsiny görbülés is akkora erőket eredményez, amelyek meg tudják emelni az óceánok vizét.

Miller bolygóján (17. fejezet) az árapályerők a földinél sokkal nagyobbak, és fontos szerepük van azoknak az óriási hullámoknak a kialakulásában, amelyekkel Cooper és csapata találkozik.

Jelenleg tehát az árapályerők három leírási módját ismerjük:

1. *Newton-féle* (4.8. ábra): A Föld nem a Hold teljes gravitációs vonzását érzékeli (ami a Föld különböző helyein más és más), csak annak az átlag levonása után megmaradó részét.
2. *Tendex-vonalakon alapuló* (4.9. ábra): A Hold tendex-vonalai széthúzzák és összenyomják a földi óceánokat, hasonlóan ahhoz, ahogyan egy fekete lyuk tendex-vonalai távolítja és közelíti a körülötte keringő bolygók, csillagok pályáit (4.7. ábra).
3. *Legrövidebb út* (4.6. ábra): A csillagok és bolygók fekete lyuk körüli pályái a lyuk görbült térideje által megengedett legrövidebb utak.

Ugyanannak a jelenségnek három különböző megközelítési módja rendkívül hasznos lehet. A tudósok és mérnökök pályafutásuk nagy részét fejtörők megoldásával töltik. Ilyen lehet például az, hogy miként tervezzünk meg egy űrszondát? Vagy találjuk ki, hogyan viselkedik egy fekete lyuk. Bármilyen legyen is a megoldandó feladat, ha egyik megközelítés nem működik, egy másik még eredményes lehet. Egy problémát új nézőpontból megközelítve gyakran új ötleteink támadnak. Ezt teszi Brand professzor a *Csillagok között-ben*, amikor megpróbálja megérteni és kihasználni a gravitációs anomáliákat (24. és 25. fejezet), és ezt tettem én is felnőtt életem nagy részében.

5. Fekete lyukak



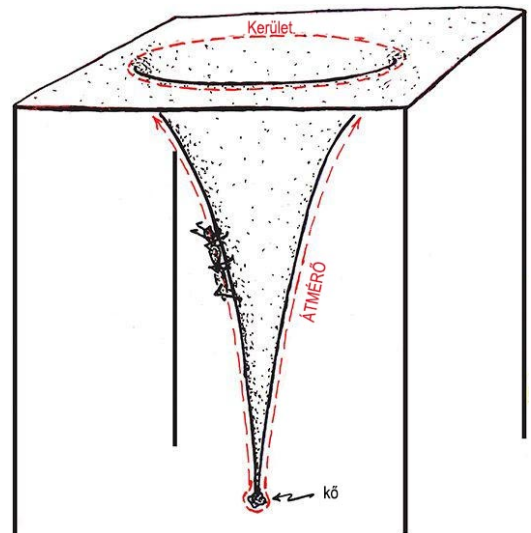
A Gargantua fekete lyuk főszerepet játszik a *Csillagok között*-ben. Ebben a fejezetben összefoglaljuk a fekete lyukakra vonatkozó legfontosabb ismereteket, hogy aztán a következőben a Gargantuára koncentrálhassunk.

Meglepő állítással nyitunk: Egy *fekete lyuk* pusztán görbült tér és görbült idő. Semmi más - anyagot egyáltalán nem tartalmaz.

Most pedig egy kis magyarázat jön.

Hangya a gumiasztalon: Egy fekete lyuk görbült tere

Képzeljük el, hogy hangyák vagyunk, és egy ugrálóasztalon (trambulin) - azaz egy rudak közé kifeszített gumilepedőn - élünk. A gumit egy nehéz kő nyomja lefelé, ahogyan ezt az 5.1. ábra mutatja. Sajnos vak hangyák vagyunk, így nem láthatjuk sem a rudakat, sem a követ, de a meghajlott gumilepedőt sem. De okos hangyák vagyunk. A gumilepedő az egész univerzumunk, és sejtjük róla, hogy görbült!



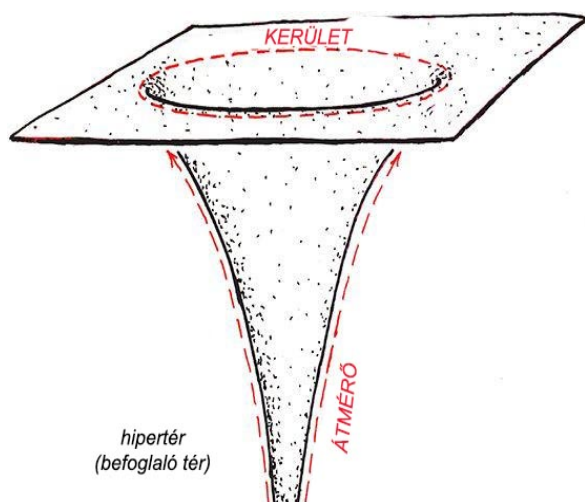
5.1. ábra

Egy hangya a trambulin meghajlott gumilepedőjén (saját vázlatom)

Alakjának meghatározásához körbesétálunk a felső részén egy kör mentén, megmérve annak területét, majd a középponton keresztül a kör egyik pontjából átsétálunk az ellentétes oldalra, és közben megmérjük az átmérőjét. Ha univerzumunk sík lenne, akkor a terület az átmérő π -szeresének (3,14159...) adódna. Azt találjuk azonban, hogy a terület sokkal kisebb, mint az átmérő. Ebből pedig azt a következtetést vonjuk le, hogy univerzumunk erősen görbült!

Egy nem forgó fekete lyuk körüli görbült tér pontosan olyan, mint a trambulin esetében: Tekintsünk egy egyenlítői metszetet a fekete lyuk körül. Ez egy kétdimenziós felület. A befoglaló térből nézve ez a felület ugyanolyan módon görbült, mint a trambulin gumilepedője. Az 5.2. ábra ugyanaz, mint az 5.1. ábra, de elhagytam róla a hangyát és a rudakat, a követ pedig a fekete lyuk közepén egy *szingularitással* helyettesítettem.

A szingularitás olyan kicsiny térrész, ahol a felület egy pontra húzódik, és így *végtelen nagy görbületű* lesz, a gravitációs árapályerők pedig szintén végtelen nagygyá válnak, így az anyag - abban a formájába, ahogyan ismerjük - megszűnik létezni. A 26., 28. és 29. fejezetben látni fogjuk, hogy a Gargantua szingularitása némileg különbözik ettől, és azt is, hogy miért.



5.2. ábra

A tér görbülete a fekete lyukban és körülötte a befoglaló térből nézve (saját vázlatom)

A trambulín esetében a tér görbülését a kő súlya okozta. Ez alapján azt gondolhatnánk, hogy a fekete lyukak körüli térgörbületet a centrumukban lévő szingularitás okozza. Ez azonban nem így van. Valójában a lyuk terét a görbületben tárolt hihetetlen mennyiségű energia görbíti. Igen, pontosan ezt akartam mondani. Elismerem, kissé furcsán hangzik, de nagyon mély jelentése van.

Ahogy nagy energiát igényel egy íj kifesztése a nyílvevő kilövése előtt, a tér meggörbítéséhez is hatalmas mennyiségű energia szükséges. A kilövésig - amikor a nyílvevő mozgási energiájává alakul - a rugalmas energia a megfeszített íjban tárolódik, ugyanígy tárolja a fekete lyuk körüli görbült tér a görbítéshez szükséges energiát. Fekete lyuk esetében ez az energia pedig olyan nagy, hogy görbületet generál.

A görbület nemlineáris módon, pozitív visszacsatolással görbületet indukál. Ez az Einstein-féle relativisztikus törvények alapvető sajátossága, ami nagyon különbözik a mindennapi tapasztalattól. Sci-fi hasonlattal élve: képzeljünk el egy szereplőt, aki visszamegy a múltba és megszüli saját magát.

Ez a „térgörbítő görbület”-forgatókönyv Naprendszerünkben egyáltalán nem valósulhat meg, itt ugyanis nagyon kicsi a tér görbülete, az abban tárolt energia csekély, sokkal kisebb annál, amekkora elindíthatná az öngerjesztő folyamatot. A Naprendszerben tapasztalható térgörbülést majdnem teljes egészében közvetlenül az anyag okozza - a Nap, a Föld és a többi bolygó anyaga, míg egy fekete lyuk esetében a görbülésért egy az egyben a görbület maga felelős.

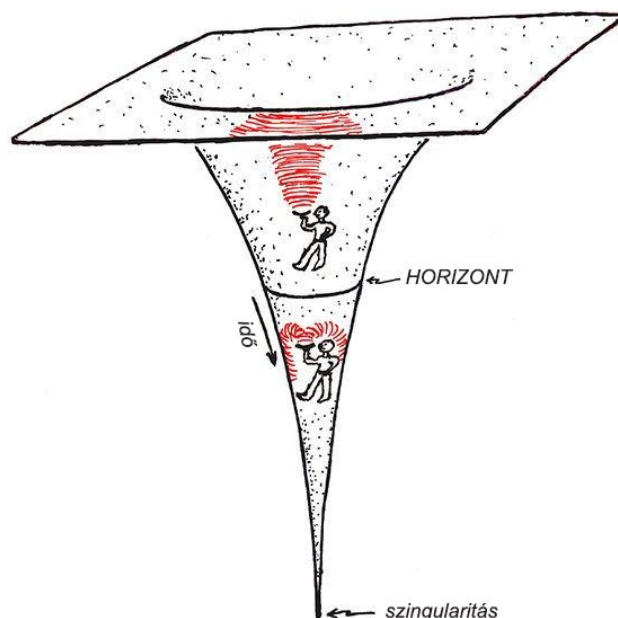
Az eseményhorizont és a görbült idő

Amikor először hallunk fekete lyukról, valószínűleg az 5.3. ábrán illusztrált csapdába ejtő képességére gondolunk és nem a görbült terére.

Ha egy mikrohullámú adóval a kezemben egy fekete lyukba zuhanok, akkor először a lyuk eseményhorizontján haladok át. Ellenállhatatlanul vonz valami lefelé, a lyuk szingularitásába. Akármilyen jelzés, bármilyen módon próbálom is azt leadni, velem együtt zuhan lefelé. A horizont felett elhelyezkedő megfigyelő soha nem fogná azokat a jeleket, amelyeket a horizont átlépése után küldök. A jelzéseim velem együtt csapdába esnek a fekete lyuk belsejében. (Lásd a 28. fejezetet, hogy ez miként történik a Csillagok között-ben.)

A csapdába esés valójában a fekete lyuk időgörbülete miatt történik. Ha a fekete lyuk felett keringek egy rakétahajtómű tolóerejével megtámogatva, annál lassabban múlik az idő számomra, minél közelebb vagyok a horizonthoz. A horizontig annyira lelassul, hogy ott meg is áll, így Einsteinnek az időgörbületre vonatkozó törvénye szerint végtelenül erős gravitációs vonzást kell érzékelnem.

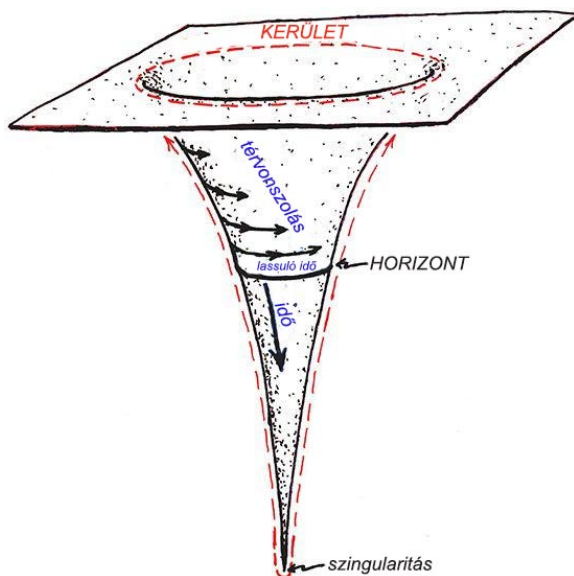
Mi történik az eseményhorizonton belül? Ott az idő olyan extrém módon meggörbül, hogy már térdimenziónak gondolhatnánk: a szingularitás irányában lefelé folyik. Ez a lefelé irányuló áramlás az oka valójában annak, hogy a fekete lyukból semmi sem tud kiszabadulni. Minden hihetetlen erővel tolódik a jövőbe¹⁸, és mivel a fekete lyuk belsejében a jövő lefelé van, a horizont irányával ellentétesen, felfelé, a horizonton keresztül semmi sem tud kiszabadulni.



5.3. ábra

Az eseményhorizont átlépése után küldött jelzésem már nem tud kijutni. Megjegyzés: Mivel az ábráról egy térdimenziót elhagytam, ezért csak egy kétdimenziós Kip vagyok, aki csúszik lefelé a kétdimenziós görbült felületen, ami a bránunk része (saját vázlatom)

¹⁸ Ha lehetséges volna az időben visszafelé utazni, ez csak úgy menne, hogy a térben közben kifelé mozgunk, és végül visszatérnénk a kiindulási pontunkra, még azelőtt, hogy onnan elindultunk volna. Nem tudunk visszafelé menni az időben úgy, hogy egy adott helyen maradunk, és közben azt figyeljük, hogy mások itt az időben előre haladnak, bővebben lásd a 30. fejezetben.



5.4. ábra

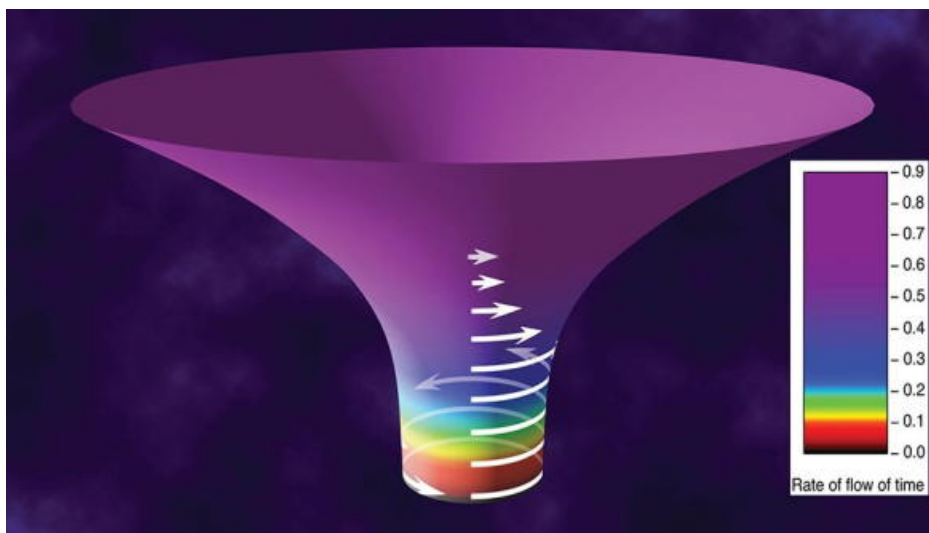
A forgó fekete lyuk körül örvénylik a tér (saját vázlatom)

Térörvénylés

A fekete lyukak foroghatnak, ahogyan a Föld is forog a tengelye körül. Egy forgó fekete lyuk örvényhez hasonló kavargó mozgásban magával ragadja a körülötte lévő teret (5.4. ábra). Ahogyan a levegő a tornádóban, a fekete lyuk centrumának közelében a tér gyorsabban örvénylik, míg kifelé, a lyuktól távolodva lassul ez a mozgás. Mindent, ami a horizont felé esik, magával ragad a tér örvénylése, a lyuk körüli kavargó mozgás, hasonlóan ahhoz, ahogyan a szalmát elragadja a tornádó szele. A horizont közelében már semmi sem véd attól, hogy a térörvény magával sodorjon.

Egy fekete lyuk görbült terének és idejének pontos ábrázolása

A téridő görbületének három megjelenését - a tér görbületét, az idő lassulását és torzulását, valamint a tér örvénylését - Einstein relativisztikus törvényeiből származtatott matematikai formulák írják le, amelyek pontos, az 5.1.-5.4. ábrák kvalitatív képével szemben immár kvantitatív előrejelzéseit az 5.5. ábra mutatja.



5.5. ábra

Egy gyorsan forgó fekete lyuk körüli görbült tér és idő pontos ábrázolása. A fekete lyuk a lehetséges maximális sebesség 99.8 százalékával forog (Don Davis vázlatomon alapuló rajza)

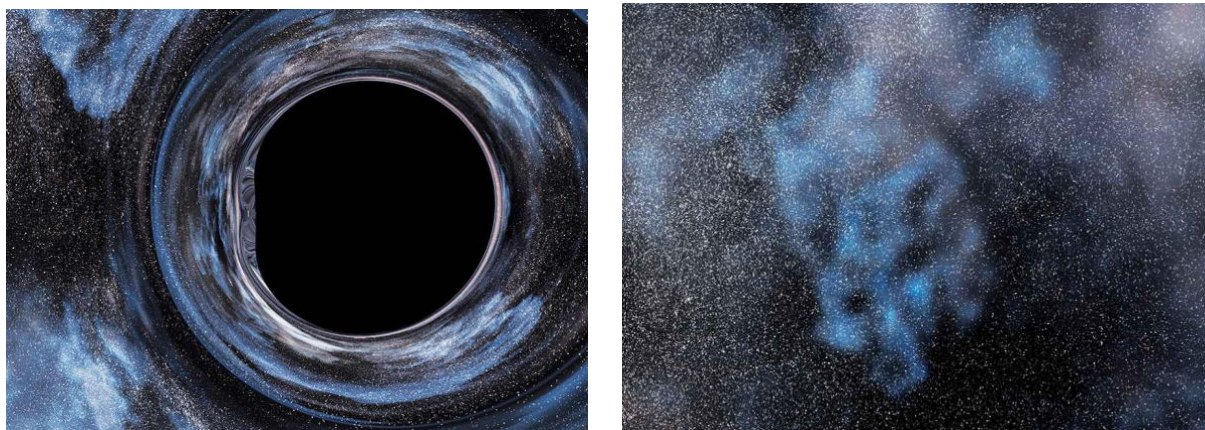
Az 5.5. ábrán látható felület görbült alakja pontosan olyan, amilyent a befoglaló

térből lámánk a lyuk egyenlítői síkjában vizsgálódva. A színek az időnek a horizont felett

állandó magasságban lebegő megfigyelő által mérhető lassulási ütemét jelzik. A kék és a zöld közötti átmenetnél az idő múlásának sebessége 20 százaléka a lyuktól távol mérhető értéknek. A sárgából pirosba történő váltásnál ez már csak a normál érték 10 százaléka. A felület alsó részénél látható fekete körnél pedig megáll az idő. Ez az eseményhorizont. Nem gömb, csak kör, mivel univerzumunk (vagy bránunk) két dimenziójában, az egyenlítői síkban vizsgálódunk csak. Ha a harmadik térdimenziót is figyelembe vennénk, a horizont egy lapult gömb, forgási ellipszoid lenne. A fehér nyilak azt jelzik, hogy a tér milyen ütemben örvénylik a fekete lyuk körül. Ez leggyorsabb a horizontnál, és csökken, amint egy úrhajóval felfelé emelkedünk.

A teljes mértékben pontos 5.5. ábrán nem ábrázoltam a lyuk belsejét. Ezt később, a 26. és 28. fejezetben fogjuk megtenni.

Az 5.5. ábra görbülete a fekete lyuk lényege. A matematikai leírásából a fizikusok a fekete lyuk minden tulajdonságát származtatni tudják, egy kivétellel, ez pedig a centrumban lévő szingularitás természete. Ennek leírásához az egyelőre még kevésbé értett kvantumgravitáció törvényei szükségesek (26. fejezet).



5.6. ábra

Egy, a jobb oldalon látható csillagmező előtt gyorsan forgó fekete lyuk [balra] (A Double Negative vizuális effektusokért felelős részlege által a könyv számára készített szimuláció)

Milyen egy fekete lyuk az univerzumunkból nézve?

Mi, emberek a saját bránunkba vagyunk zárva. Nem léphetünk ki belőle a befoglaló térbe (hacsak egy rendkívül fejlett civilizáció nem enged bennünket egy hiperkockához, vagy valami hasonló eszközhöz, ahogyan azt Cooperrel is tették a *Csillagok között*-ben, lásd 29. fejezet). Ezért nem is láthatjuk egy fekete lyuk 5.5. ábrán mutatott görbült terét. A filmekben, például a Disney

Stúdió 1979-es, *Fekete lyuk* című mozijában gyakran ábrázolt feketelyuk-tölcséreket és -örvényeket az univerzumunkban létező egyetlen teremtmény sem láthatná soha.

A *Csillagok között* az első hollywoodi film, amelyik korrekt módon mutat be egy fekete lyukat, abban az értelemben, hogy valójában hogyan láthatnánk és érzékelhetnénk. Az 5.6. ábra egy példa, nem a filmből származik. A fekete lyuk fekete árnyékot vet a mögötte elhelyezkedő csillagmezőre. A csillagok fénysugarait elhajlítja a lyuk görbült tere, a *gravitációs lencsézés* koncentrikus, torzult mintázatot eredményez. Az árnyék bal oldala felől érkező fénysugarak ugyanabban az irányban mozognak, mint amerre a tér örvénylik. A térörvény segít nekik abban, hogy a horizonthoz közelebb is megszökhessenek, mint az árnyék jobb oldalán érkező sugarak, amelyek az örvénnyel ellentétes irányban haladnak. Ezért horpadt az árnyék a bal oldalon, és dudorodik ki a jobb oldalon. Erről a 8. fejezetben bővebben is lesz szó, mikor azt tárgyalom, hogyan is fest egy fekete lyuk az univerzumunkból, más szóval a *bránunkból* közről nézve.

Honnan tudjuk, hogy mindez igaz?

Einstein relativisztikus törvényeit nagy pontossággal ellenőrizték. Meg vagyok győződve róla, hogy igazak, kivéve, amikor a kvantumfizika törvényeivel ütköznek. A *Csillagok között* Gargantuájá-hoz hasonló nagy fekete lyukak esetében a kvantumtörvények csak a centrumához, a szingularitáshoz közel meghatározóak. Ezért ha univerzumunkban egyáltalán léteznek fekete lyukak, azoknak a korábban leírt, Einstein relativisztikus törvényei által megszabott tulajdonságai vannak.

Ezeket a tulajdonságokat sok-sok, egymás munkájára támaszkodó és építő fizikus határozta meg az Einstein-féle egyenletekből (5.7. ábra), közülük a legfontosabbak Karl Schwarzschild, Roy Kerr és Stephen Hawking. 1915-ben, röviddel az első világháború német-orosz frontján bekövetkezett tragikus halála előtt, Schwarzschild részletesen leírta a téridőt egy nem forgó fekete lyuk körül.¹⁹ A fizikusok szóhasználatával ezeket a részleteket összefoglalóan „Schwarzschild-metrikának” hívjuk. 1963-ban az új-zélandi matematikus, Kerr ugyanezt megtette forgó fekete lyukakra is: az általa adott megoldás a „Kerr-metrika”. Az 1970-es évek elején pedig Stephen Hawking és mások meghatározták azokat a törvényeket, amelyeknek egy fekete lyuknak engedelmeskednie kell, ha csillagokat nyel el, ütközik vagy összeolvad más fekete lyukkal, esetleg más objektumok árapályerejét érzékeli.

¹⁹ Karl Schwarzschild a fronton betegedett meg, de már a németországi gyógykezelése közben halt meg

Fekete lyukak biztosan léteznek. Einstein relativisztikus törvényei előírják, hogy amikor egy nagy tömegű csillag magas hőmérsékletét és sugárzását biztosító nukleáris üzemanyag elfogy, a csillag összeroskad. 1939-ben J. Robert Oppenheimer és tanítványa, Hartland Snyder az Einstein-



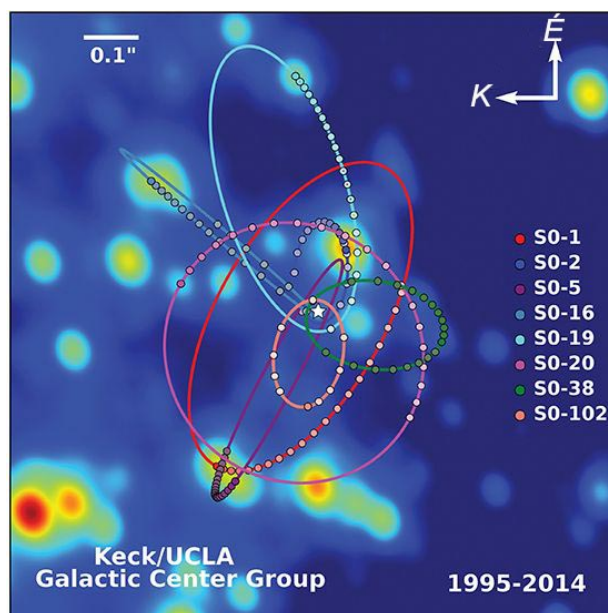
5.7. ábra

Fekete lyukakkal foglalkozó tudósok. Balról jobbra: Karl Schwarzschild (1873–1916), Roy Kerr (1934–), Stephen W. Hawking (1942–), J. Robert Oppenheimer (1904–1967), and Andrea Ghez (1965–).

törvények alapján felfedezte, hogy ha az összerosuhanás egészen gömbszimmetrikus, az összeroskadó csillagnak fekete lyukat *kell* létrehoznia, ami által a lyuk centrumában keltett szingularitás majd el is nyeli az egykori csillagot. A folyamat után nem marad anyag. Egyáltalán nem. A keletkező fekete lyuk teljes egészében görbült térből és időből áll. Az 1939 óta eltelt évtizedekben a fizikusok Einstein törvényei alapján kimutatták, hogy ha az összeroskadó csillag forog és alakja nem gömbszerű, akkor is fekete lyukat hoz létre. Számítógépes szimulációkkal minden részlet felfedhető.

A csillagászok meggyőző bizonyítékokat szolgáltatnak arra, hogy univerzumunkban sok-sok fekete lyuk létezik. A legszebb példa a Tejútrendszer centrumában található nagy tömegű fekete lyuk.

Andrea Ghez (UCLA) az általa vezetett kicsiny csillagászcsoporthal a fekete lyuk körüli csillagok mozgását követte nyomon (5.8. ábra) Minden pálya mentén a csillagok helyzetét jelző pontok időben egy év eltérést jelentenek. A fekete lyuk pozícióját egy fehér, ötágú szimbólummal jelöltem. A csillagok észlelt mozgásából Ghez meghatározta a lyuk gravitációs vonzásának erejét, ami egy adott távolságban 4,1 milliószorosa a Nap ugyanekkora

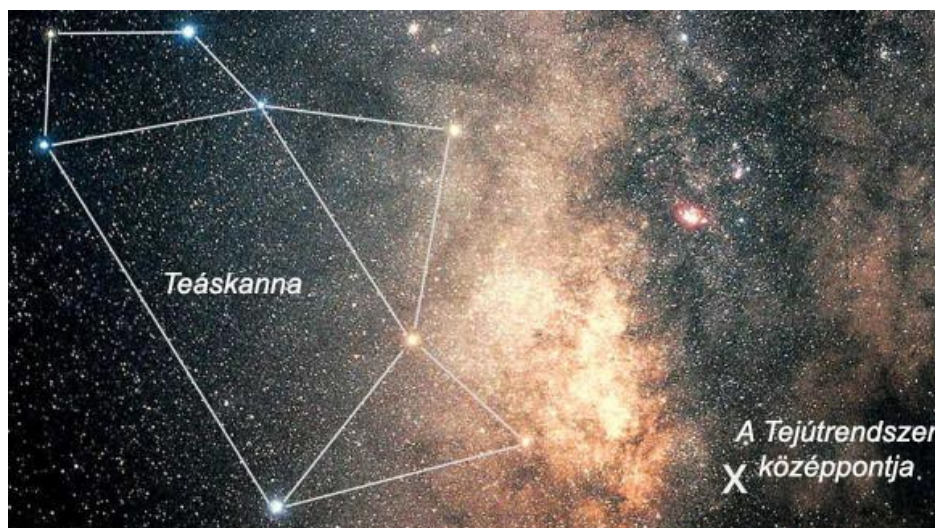


5.8. ábra

Tejútrendszer centrumában helyet foglaló nagy tömegű fekete lyuk körüli csillagpályák Andrea Ghez és munkatársainak mérései alapján

távolságban fellépő vonzásának. Ez azt jelenti, hogy a fekete lyuk tömege 4.1 milliószorosa a Napénak!

Az 5.9. ábra a nyári égboltnak azt a területét mutatja, ahol a fekete lyuk elhelyezkedik, a



5.9. ábra

A Tejútrendszer középpontjának pozíciója az égbolton, ahol egy nagytömegű fekete lyuk található

Nyilas (Sagittarius) csillagkép jobb alsó részén, a Teáskanna közelében, az „x”-szel jelölt „galaktikus centrumban”.

Az univerzum majdnem minden nagy galaxisának centrumában van egy nagy tömegű fekete lyuk. Ezek közül sok akkora, mint a Gargantua (100 millió naptömeg), vagy még ennél is nehezebb. Az eddig talált legnagyobb fekete lyuk tömege a Napénak 17 milliárdszorosa, az NGC 1277 katalógusjelű galaxis centrumában foglal helyet, amely körülbelül 250 millió fényévre van tőlünk - ez nagyjából százada a megfigyelhető univerzum széléig mérhető távolságnak.

Saját galaxisunkban mintegy 100 millió kisebb fekete lyuk is lehet, ezek tömege tipikusan három és harminc naptömeg közé esik. Nem azért tudunk róluk, mert mindegyik létezésére közvetlen bizonyítékunk lenne, hanem azért, mert a csillagászok felmérték, hogy hány olyan nagy tömegű csillag van, amelyik a nukleáris üzemanyagának elfogytával fekete lyukká válik. Ebből a felmérésből pedig következtetni tudtak arra, hogy a kiégés és a fekete lyukká alakulás hány ilyen csillag esetében történt már meg.

Fekete lyukak tehát sűrűn előfordulnak univerzumunkban. Szerencsére a Naprendszerben éppen egy sincs. Ha lenne, akkor a lyuk gravitációja végzetes hatást gyakorolna a Föld pályájára. Bolygónk vagy túlságosan közel kerülne a Naphoz, és ott elpárologna, vagy nagyon messze attól, ahol viszont megfagyna, esetleg kidobódna a Naprendszerből, vagy éppen egyenesen a fekete lyukba zuhanna.

Az emberiség egy évnél tovább egyik esetben sem élhetné túl.

A csillagászok becslése szerint a Földhöz legközelebbi fekete lyuk körülbelül 300 fényévre van: százszor messzebb, mint a Naprendszerhez legközelebbi csillag, a Proxima Centauri.

Az univerzumra, az erőterekre, a görbült időre és térre, de különösen a fekete lyukakra vonatkozó legfontosabb ismeretekkel felvértezve immár készen állunk a *Csillagok között* Gargantuájának felfedezésére.

II. GARGANTUA

6. A Gargantua anatómiája

Ha tudjuk egy fekete lyuk tömegét és azt, hogy milyen gyorsan forog, akkor az Einstein-féle relativisztikus törvényekből minden más tulajdonságát meg tudjuk határozni: gravitációs vonzásának erősségét, azt, hogy az egyenlítője mentén a centrifugális erők mennyire húzzák kifelé az eseményhorizontját, a mögötte elhelyezkedő objektumokra gyakorolt gravitációslelencehatásának részleteit, mindent.

Ez bámulatos. Annyira különbözik a mindennapi tapasztalatoktól. Képzeld el: a súlyomból és abból, hogy milyen gyorsan tudok futni, mindent meg lehetne mondani rólam, a szemem színét, az orrom hosszát, az IQ-mat...

John Wheeler (mesterem, aki a „fekete lyuk” elnevezést is kitalálta²⁰) a helyzet leírására az „egy fekete lyuknak nincs haja” mondást használta - azaz tömegén és a forgási ütemén kívül nincs további, *független* tulajdonsága. Valójában azt kellett volna mondania, hogy „egy fekete lyuknak csak két hajszála van, amiből minden mást meg tudsz mondani róla”, ez azonban kétségtelenül nem hangzik, olyan jól, mint a „kopasz”, ami aztán meg is ragadt a fekete lyukak irodalmában és a tudósok szóhasználatában²¹. Miller bolygójának filmbeli tulajdonságaiból egy fizikus, aki ismeri az einsteini relativisztikus törvényeket, meg tudja határozni a Gargantua tömegét és forgási sebességét, ezekből pedig minden más paraméterét is. Lássuk, hogyan²².

A Gargantua tömege

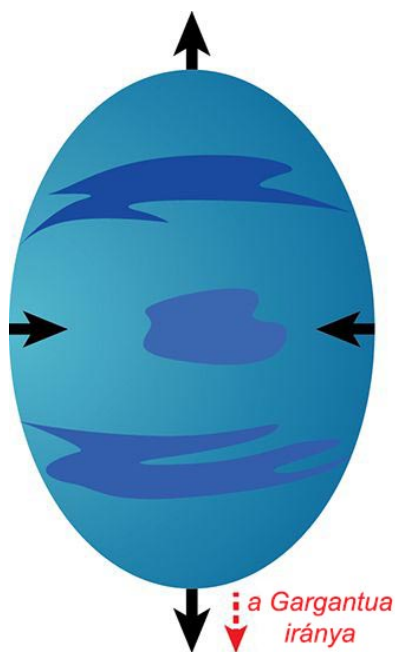


Miller bolygója (amelyről hosszasan fogok értekezni a 17. fejezetben) olyan közel kering a Gargantuához, amennyire csak lehetséges. Ezt abból tudhatjuk, hogy a legénység által tapasztalt extrém időlassulás csak a Gargantua közvetlen közelében léphet fel.

²⁰ Wheeler saját bevallása szerint a fekete lyuk kifejezés nem tőle ered, hanem az egyik előadása végén a hallgatóságból kiabálta be valaki. Wheelernek annyira megtetszett a találó elnevezés, hogy használatával hamar átvitte a köztudatba.

²¹ A kifejezés szó szerinti francia fordítása annyira obszcén, hogy a kiadók élénken tiltakoztak ellene, de hiába.

²² A kvantitatív részletekért lásd a *Néhány szakmai megjegyzés* című részt a könyv végén



6.1. ábra

A Gargantua árapályereje széthúzza és összelapítja Miller bolygóját

Ilyen közel a Gargantua árapályereje (4. fejezet) különösen nagy. Miller bolygóját a lyuk irányának egyenesében széthúzza, arra merőlegesen pedig összenyomja (6.1. ábra).

A húzó- és az összenyomó erő nagysága fordítottan arányos a Gargantua tömegének négyzetével. Miért? Minél nagyobb a Gargantua tömege, annál nagyobb a kerülete, és így a bolygó különböző részeire gyakorolt gravitációs vonzóereje is egyre inkább azonos lesz, ami gyengébb árapályerőket eredményez. (Lásd az árapályerők newtoni tárgyalását, 4.8. ábra.) A részleteket kidolgozva arra a következtetésre jutottam, hogy a Gargantua tömegének legalább 100 milliószorosának kell lennie a Napénak. Ha ennél sokkal kisebb lenne, akkor Miller bolygóját egyszerűen széttépné.

A Csillagok között történéseivel kapcsolatos magyarázataimban azt teszem fel, hogy ekkora a Gargantua tömege: 100 millió naptömeg²³. Ezt az értéket használom például a 17. fejezetben, amikor azt magyarázom el, hogy a Gargantua árapályerői miként tudták létrehozni azokat az óriási hullámokat, amelyek elárasztották a Rangert Miller bolygóján.

A fekete lyuk eseményhorizontjának kerülete arányos a lyuk tömegével. A Gargantua esetében a 100 millió naptömeggel a horizont kerületére körülbelül a Föld Nap körüli pályájának hossza, mintegy 1 milliárd kilométer adódik. Ez óriási! Miután megbeszélte velem, Paul Franklin vizuális effektusok részlege ezt a kerületet használta a Csillagok között képeinek előállításakor.

A fizikusok a fekete lyukhoz sugárként az eseményhorizont kerületének 2π -nyi (kb. 6,28-ad) részét rendelik. A fekete lyuk belsejében fellépő óriási térgörbület miatt azonban ez nem a lyuk valódi sugara. Nem a horizonttól a lyuk középpontjáig terjedő valódi távolság, hanem az eseményhorizont sugara (átmérőjének fele) a befoglaló térben mérve, lásd a 6.3. ábrát később. A Gargantua sugara ebben az értelemben körülbelül 150 millió kilométer, ugyanakkora, mint a Föld Nap körüli keringésének pályasugara.

²³ Sokkal realisabb lett volna a 200 millió naptömeg, de a lehető legegyszerűbb számokat akartam használni, úgy is van elég gond velük, ezért választottam a 100 milliót.

A Gargantua forgása



Amikor Christopher Nolan megemlítette, hogy Miller bolygóján mekkora időlassulást szeretne - *egy óra ott hét földi év* - először szóhoz sem jutottam. Lehetetlennek tartottam, és ezt meg is mondtam Chrisnek. „Nem vita tárgya!” - válaszolta ő. Így, nem először és nem is utoljára, hazamentem, gondolkodtam rajta, elvégeztem néhány számítást az einsteini egyenletek alapján, és találtam egy megoldást.

Rájöttem, hogy ha Miller bolygója annyira közel van a Gargan-tuához, hogy még éppen nem zuhan bele²⁴, a Gargantua pedig elég gyorsan pörög, akkor a Chris által kívánt „egy óra hét földi év” időlassulás mégiscsak lehetséges. Ehhez azonban a Gargantuának *hihetetlenül gyorsan* kell forognia.

Létezik egy maximális sebesség, amelynél semmilyen fekete lyuk nem pöröghet gyorsabban. Ha ugyanis ez megtörténne, akkora horizontja eltűnne, az egész univerzum számára láthatóvá téve a belsejében lévő szingularitást, azaz *lecsupaszítaná* azt - amit viszont valószínűleg tiltanak a fizika törvényei (26. fejezet).

Úgy találtam, hogy Chris óriási időlassulásához a Gargantuának majdnem a lehetséges maximális sebességgel kell forognia: az eltérés mindössze 100 billiomod rész lehet²⁵. A legtöbb magyarázatban ezt a forgási ütemet használom.

Az *Endurance* legénysége közvetlenül tudja mérni a forgási ütemet, amikor nagyon messziről figyel, amint TARS, a robot a Gargantuába zuhan (6.2. ábra)²⁶. Távolról nézve TARS soha nem lépi át a horizontot (mivel a jelek, amelyeket ezután küldene, nem tudnák elhagyni a fekete lyukat). Ehelyett TARS zuhanása lassulni látszik, úgy tűnik, mintha a horizont felett lebegne, a Gargantua örvénylő tere pedig messziről nézve körbe-körbe hajtja a fekete lyuk körül. A Gargantua maximálishoz nagyon közeli forgási sebessége miatt TARS keringési periódusa, szintén távolról figyelve, körülbelül egy óra.

A szükséges számításokat bárki elvégezheti: a keringési távolság a Gargantuától egymilliárd kilométer, amit TARS egy óra alatt tesz meg, így a távolról mérhető sebessége óránként 1 milliárd kilométer, ami nagyon közel van a fénysebességhez! Ha a Gargantua a maximális sebességnél

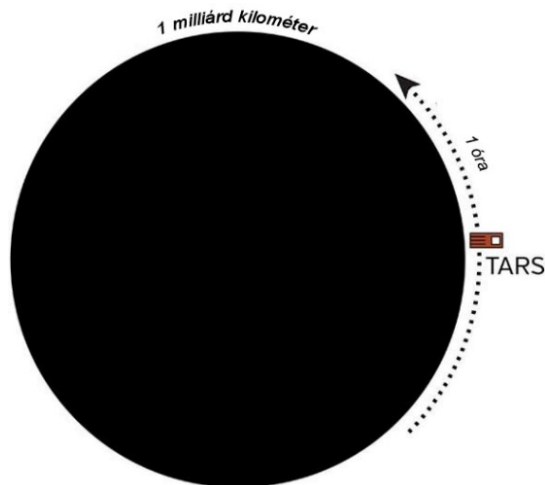
²⁴ Lásd a 17.2. ábrát és a magyarázatot a 17. fejezetben.

²⁵ Más szavakkal a forgási ütem a lehetséges maximum mínusz 0,00000000000001-szer a maximum.

²⁶ Amikor TARS a lyukba zuhan, az *Endurance* valójában nincs nagyon messze, hanem az ún. kritikus pályán kering a horizont közvetlen közelében, majdnem olyan gyorsan, mint ahogyan TARS mozog, így Amelia Brand az *Endurance*-ben nem látja a nagy sebességgel keringő TARS-t. Bővebben lásd a 27. fejezetben

gyorsabban forogna, akkor TARS a fénysebességnél gyorsabban keringene körülötte, ami viszont sértené az einsteini alapelvet. Ez a heurisztikus magyarázata annak, hogy a fekete lyukak miért nem pöröghetnek gyorsabban a lehetséges legnagyobb forgási ütemnél.

1975-ben felfedeztem annak a módját, hogy a természet miként óvja meg a fekete lyukakat



6.2. ábra

*TARS, a Gargantuába zuhanva, távolról figyelve
óránként egyszer körbejár a lyuk 1 milliárd kilométer
kerületű horizontja mentén.*

attól, hogy a maximális sebességnél gyorsabban forogjanak: Ha ennek a sebességnek a közelébe kerül, egy fekete lyuk egyre nehezebben tudja elnyelni azokat az objektumokat, amelyek a forgásával egy irányban keringenek körülötte, és így a befogás után növelhetnék az impulzusnyomatékát, ezzel pedig a forgási ütemét. Könnyen elnyeli viszont azokat, amelyek a forgásával ellentétes irányban keringenek, és így a befogás után lassítják a pörgést. A maximum közelében tehát a forgás könnyebben lassul.

A vizsgálatban egy *akkréciós (anyag- vagy tömegbefogási) korong* játszott a főszerepet. Ez egy, a Szaturnusz gyűrűihez hasonlító gázkorong, amely a fekete lyuk körül, annak forgásával megegyező irányban kering, örvénylik (9. fejezet). A korongban fellépő súrlódás miatt a gáz lassan a fekete lyukba spirálozik, és felpörgeti azt. A súrlódás azonban fel is fűti a gázt, ami ennek következtében fotonokat bocsát ki. A lyuk körül örvénylő tér elkapja és kihajítja azokat a fotonokat, amelyek a forgással azonos irányban mozognak, így azok nem hullanak a lyukba. Ezzel éppen ellenkezőleg: a térorvény a forgással ellentétes irányban mozgó fotonokat a lyukba szippantja, így azok lassítják a pörgést. Ha a forgási sebesség eléri a maximális érték 0,998 részét, beáll egy egyensúlyi állapot, amelyben az elnyelt fotonok pontosan annyira lassítják a forgást, amennyire a beáramló gáz gyorsítja. Az egyensúlyt beállító folyamat nagyon hatékonynak tűnik. Úgy vélem, hogy az asztrofizikában előforduló legtöbb esetben a fekete lyukak nem forognak gyorsabban a maximumérték 99,8 százalékánál.

El tudok képzelni azonban olyan szituációt - amely nagyon ritka, vagy valójában talán soha nem is következik be, mindazonáltal nem lehetetlen -, amikor a forgási ütem jóval közelebb kerül a maximális értékhez, akár annyira is, hogy lehetségessé váljon a Chris által Miller bolygójára megkövetelt időlassulás, azaz csak 100 billiomod résszel maradjon el a maximumtól. Valószínűtlen, de nem lehetetlen.

Ilyesmi gyakran előfordul a filmekben. Azért, hogy jó mozit csináljanak, a kiváló rendezők gyakran eltúloznak dolgokat. A tudományos fantasy (science fantasy) filmekben, mint például a Harry Potter, a túlzással a tudományosan lehetséges határain messze túllépnek, míg a tudományos-fantasztikus (science fiction, sci-fi) filmekben általában a lehetséges birodalmán belül maradnak. Ez a legnagyobb különbség a két műfaj között. A Csillagok közötti sci-fi, nem fantasy. A Gargantua ultragyors forgása tudományos szempontból lehetséges.

A Gargantua anatómiája



A Gargantua tömegének és forgási sebességének ismeretében az Einstein-egyenleteket felhasználva kiszámítottam a felépítését. Mint az előző fejezetben, itt is kizárólag a külső szerkezetére koncentrálunk, a belsőt (különösen a Gargantua szingularitását) meghagyjuk a 26. és 28. fejezetre.

A 6.3. ábra felső részén a Gargantua egyenlítői síkját láthatjuk a befoglaló térből nézve. Hasonlít az 5.5. ábrához, de mivel a forgási sebessége nagyon közel van a lehetséges maximális értékhez (az eltérés csak 100 billiomod rész az 5.5. ábra 2 ezred részével szemben), a Gargantua torka jóval hosszabb. Sokkal tovább nyúlik lefelé, mielőtt elérné a horizontot. A befoglaló térből nézve a horizont közelében lévő rész úgy fest, mint egy hosszú henger, amelynek hossza körülbelül kétszerese a horizont területének, azaz mintegy 2 milliárd kilométer.

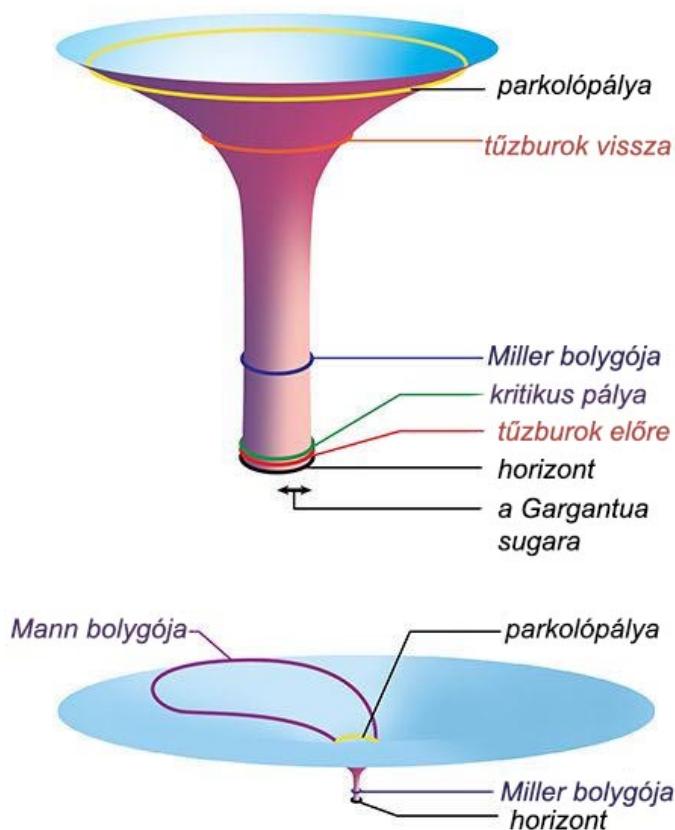
Az ábrán a henger keresztmetszetei körök, de ha a Gargantua egyenlítői síkjából kimozdulva bránunk harmadik dimenzióját is visszaállítanánk, a keresztmetszetek lapult gömbök (forgási ellipszoidok) lennének.

A Gargantua egyenlítői síkjában több területet is megjelöltem, amelyekre a magyarázataimban utalok: a Gargantua eseményhorizontja (fekete kör), a kritikus pálya, ahonnan Cooper és TARS a Gargantuába zuhan a film vége felé (zöld kör, 27. fejezet), Miller bolygójának pályája (kék kör, 17. fejezet), a pálya, amelyen az Endurance parkolt, amíg a legénység Miller bolygóján járt (sárga kör), és Mann bolygója nemegyenlítői pályájának egy szegmense az egyenlítői síkba vetítve (bíbor kör). A Mann-bolygó pályájának külső része olyan távol van a Gargantuától (600 Gargantua-sugárnyira vagy messzebb, 19. fejezet), hogy a diagramot újra kellett rajzolnom olyan skálázással,

hogyan az egész beleférjen (alsó ábra), de sajnos így sem sikerült, csak úgy tudtam ábrázolni, ha a külső részt 100 Gargantua-sugárra helyeztem a szükséges 600 helyett.

Hogyan határoztam meg ezeket a helyeket? A parkolópályát itt csak illusztrációként tüntettem fel, a többit pedig később tárgyalom. Cooper a parkolópályát így írja le: „Viszont a Gargantua körüli, a bolygóén és a fordulóponton kívül eső pályára állva...” Kellő távolságban szeretne lenni a Gargantuától, az „időeltolódáson kívül”, azaz olyan messze, ahol az idő földihez viszonyított lassulása már nem számottevő. Ezért választottam az öt Gargantua-sugárnyi távolságot (sárga kör a 6.3. ábrán). Erről a parkolópályáról a Ranger két és fél óra alatt jut el Miller bolygójára, ami megerősített abban, hogy jól gondoltam.

Volt azonban ezzel a pályával egy kis probléma. Ebből a távolságból nézve a Gargantua óriási, az *Endurance* égboltján 50 fokos területet foglalt volna el. Ami lenyűgöző lett volna, de



6.3. ábra

A Gargantua szerkezete, ha mindössze 100 billiomod résszel forog lassabban a lehetséges maximális sebességnél, amekkora a Miller bolygóján tapasztalható óriási időlassuláshoz szükséges

nemkívánatos a film ilyen korai szakaszában! Így Chris és Paul a parkolópályáról nézve sokkal kisebbre vették a Gargantuát: körülbelül két és fél fokosra, ami a telihold átmérőjének ötszöröse - még mindig hatásos, de nem nyomasztóan az.

Tűzburok

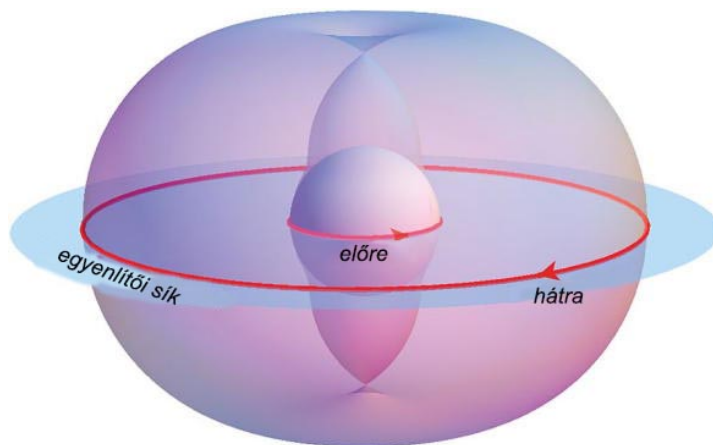


A gravitáció olyan erős a Gargantua közelében, a tér és az idő annyira görbült, hogy a fény (fotonok) csapdába eshetnek a horizonton kívüli pályákon, sokszor körbejárva a lyukat, mielőtt elszabadulnának. Ezek a csapdapályák *instabilak* abban az értelemben, hogy a fotonok végül mindig elszöknek róluk. (Ezzel ellentétben a horizonton belül rekedt fotonok soha nem juthatnak ki.)

Az átmenetileg csapdába esett fényre szívesen használok a „tűzburok” kifejezést. Fontos szerepet játszik a Gargantua vizuális megjelenését meghatározó számítógépes szimulációkban.

Egy *nem forgó* fekete lyuk esetében a tűzburok egy gömb, amelynek kerülete másfélszerese a horizonténak. A befogott fotonok ezen a gömbfelületen főkörök mentén mozognak - a Földön például ilyenek az azonos földrajzi hosszúságú helyeket összekötő vonalak -, egy részük beszívárog a fekete lyukba, míg a maradék eltávolodik tőle.

Ha egy fekete lyuk felpörög, tűzburka kifelé és befelé is kiterjed, azaz nem egy gömbfelület lesz, hanem egy véges térfogatú gömbhéj.

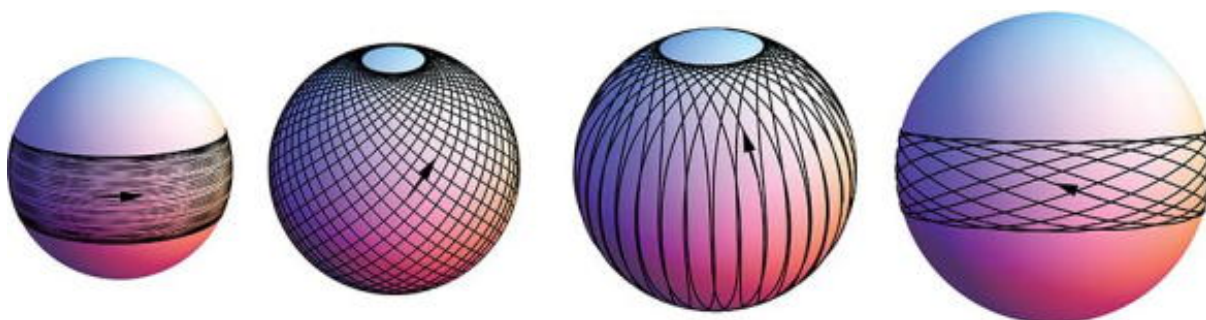


6.4. ábra

A tűzburok által elfoglalt gyűrű alakú rész a Gargantua körül

A Gargantua esetében a gyors forgás miatt az egyenlítői síkban a tűzburok a 6.3. ábrán az alsó vörös körtől a felső vörös körig terjed. Akkora, hogy nemcsak Miller bolygóját és a kritikus pályát, de sok minden mást is körbefog! Az alsó vörös kör egy olyan fénynyaláb (fotonpálya), amely a Gargantuát annak forgásirányával megegyezően járja körbe (előre irány). A felső vörös kör pedig egy olyan pálya, amelyen a fotonok a Gargantua forgásával ellentétes irányban mozognak (vissza irány). Nyilvánvaló, hogy a térörvény miatt az előre mozgó fotonok sokkal közelebb juthatnak a horizonthoz a behullás veszélye nélkül, mint a visszafelé mozgók. Micsoda roppant hatása van a tér örvénylésének!

A tűzburok által az egyenlítői sík felett és alatt elfoglalt térrészt -egy hatalmas gyűrűt - a 6.4. ábra mutatja. A tér görbülését most elhagytam, mivel akadályozta volna a tűzburok teljes háromdimenziós ábrázolását. A 6.5. ábra néhány példát mutat a tűzburokban átmenetileg csapdába eső fotonok pályáira (fénynyalábok).



6.5. ábra

Példák Einstein relativisztikus egyenletei alapján kiszámolt fénynyalábokra, azaz a tűzburokban átmenetileg csapdába eső fotonok pályáira

Mindegyik pálya centrumában a fekete lyuk helyezkedik el. A bal szélső egy kis gömb egyenlítői régióját fogja körül, a fotonok előre, a Gargantua forgásával megegyező irányban mozognak benne. Majdnem ugyanaz, mint a 6.3. és 6.4. ábra alsó (belső) vörös pályája.

A 6.5. ábra következő pályája egy kicsit nagyobb gömb felületét járja be, közel pólusirányban, de kicsit előrehajlik. A harmadik pálya még nagyobb, szintén közel pólusirányú, csak most visszafelé hajlik el attól. A negyedik jó közelítéssel ekvatoriális, és szintén visszafelé irányul, azaz nagyjából a 6.3. és 6.4. ábra felső (külső) vörös egyenlítői pályájának felel meg. Ezek a pályák valójában egymáson belül helyezkednek el, csak a jobb láthatóság érdekében választottam szét őket.

A tűzburokban átmenetileg csapdába esett fotonok egy része kiszabadul, ezek spirális pályán távolodnak a Gargantuától. A maradék éppen ellenkezőleg, spirálisan befelé, a Gargantua irányába mozog, és átlépi a horizontot. A majdnem végleg csapdába esett, de mégis kiszabaduló fotonoknak nagy hatásuk van a Gargantua filmbeli vizuális megjelenésére. Kijelölik a Gargantua árnyékának az *Endurance* legénysége által megfigyelhető határát, és létrehozzák az árnyék széle mentén látható vékony fényes vonalat, a *tűzgyűrűt* (8. fejezet).

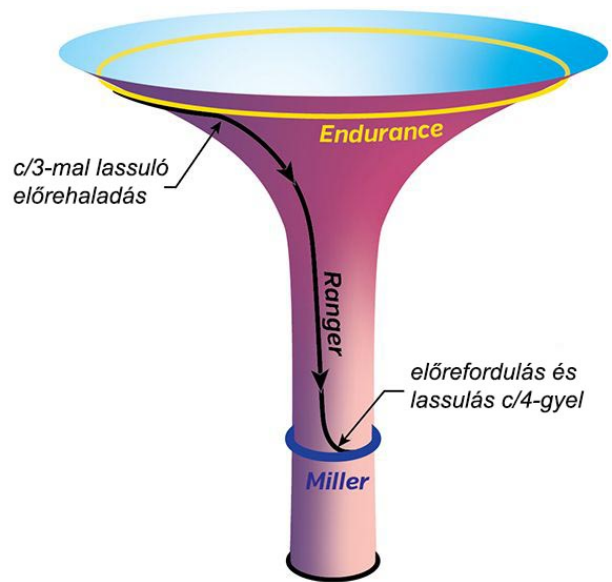
7. Gravitációs parittyák



A Gargantua körül nagyon nehéz navigálni egy űrhajót a nagy sebességek miatt. Ahhoz, hogy egy csillag, egy bolygó vagy egy űreszköz túlélje a Gargantua nagyon erős gravitációs terének hatását, hasonlóan nagy centrifugális erőnek kell hatnia rá. Ez pedig azt jelenti, hogy nagy sebességgel kell mozognia. A kalkulációk szerint közel fénysebességgel. Háttérszámításaimban az Endurance tíz Gargantua-sugárnyira parkolt a fekete lyuktól, amíg a legénység Miller bolygóján járt, és a fénysebesség harmadával mozgott: $c/3$, ahol c jelöli a fény sebességét. Miller bolygójának sebessége a fényének 55 százaléka, azaz $0,55 c$.

Ahhoz, hogy a Ranger a parkoló pályáról elérhesse a bolygót (7.1. ábra), az előrehaladó mozgását a $c/3$ sebességről sokkal kisebbre kell lassítania, hogy a Gargantua gravitációja lefelé húzhassa. Amikor pedig a bolygó közelébe kerül, a lefelé mutató irányból előre kell fordulnia. A zuhanás közben azonban a kíváncsónál jóval nagyobb sebességre tesz szert, ezért azt körülbelül $c/4$ -gyel kell csökkenteni a bolygó $0,55 c$ sebességéig, hogy találkozhatson vele.

Milyen mechanizmus segítségével érheti el a Ranger pilótája Cooper, az ilyen óriási sebességváltozásokat?



7.1. ábra

A Ranger pályája Miller bolygójáig, ahogyan azt a film számára kidolgoztam

Huszonegyedik századi technológia

A szükséges sebességváltozás nagyjából $c/3$, azaz 100 000 km másodpercenként (másodpercenként, nem óránként!).

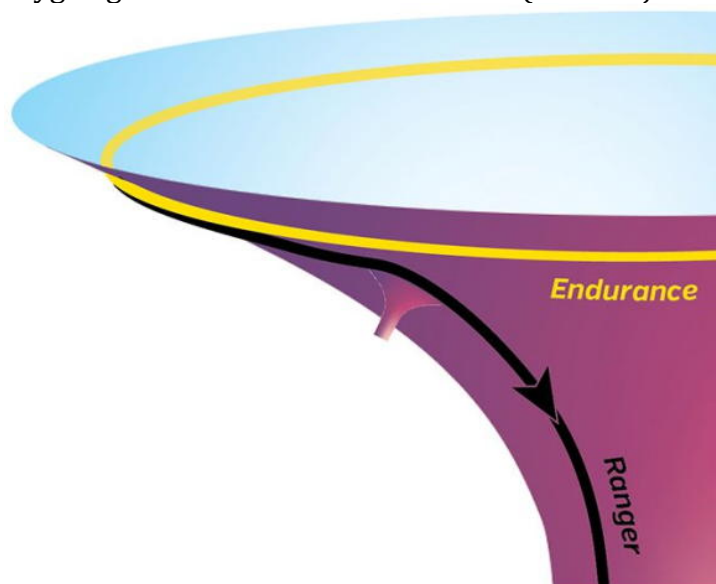
Összehasonlításként: a ma rendelkezésünkre álló legerősebb rakéták 15 km/s sebességet képesek elérni, ez hétezerszer lassúbb. A *Csillagok között-ben* az Endurance két év alatt ér a Földről a Szaturnuszhoz 20 km/s sebességgel haladva, ami még mindig ötezerszer kisebb érték. Úgy gondolom, hogy a legnagyobb sebesség, amelyet a huszonegyedik században ember által alkotott űreszköz elérhet majd, nagyjából 300 km/s lesz. Ehhez hatalmas kutatási és

fejlesztési erőfeszítések szükségesek a nukleáris meghajtás terén, és még így is háromszázszor kisebb a *Csillagok között* által igényelt sebességnél.

Szerencsére a természet kínál lehetőséget a $c/3$ nagyságrendű, óriási sebességváltozások eléréséhez: a Gargantuánál jóval kisebb fekete lyukak körül az ún. gravitációs parittyák segítségével.

Gravitációs parittyával Miller bolygójához

A Gargantuához hasonló gigantikus fekete lyukak maguk köré gyűjtik a csillagokat és a kisebb fekete lyukakat (erről bővebben a következő részben lesz szó). A filmben történtek tudományos értelmezésekor úgy képzelem, hogy Cooper és csapata felmérte a Gargantua körül keringő kisebb fekete lyukakat, és talált közöttük egy olyat, amely éppen jó helyen volt ahhoz, hogy gravitációs hatásával eltérítse a körhöz közeli pályájáról a Rangert, és Miller bolygója felé lendítse (7.2. ábra). A gravitációs kölcsönhatást kihasználó manővert - „gravitációs csúzli” vagy „gravitációs parittyá”²⁷ - a NASA gyakran alkalmazza a Naprendszerben, csak persze nem egy fekete lyuk, hanem a bolygók gravitációs hatását aknázza ki (lásd a fejezet végén).



7.2. ábra

A Ranger hintamanővert hajt végre egy kisebb fekete lyuk körül, aminek következtében pályája lefelé, Miller bolygójának irányába fordul

²⁷ Az angol nyelvű szakirodalomban a gravitational slingshot mellett a flyby és swingby kifejezések is használatosak, ezeket magyarra a gravitációs hintamanőver vagy gravitációs lendítés kifejezésekkel fordíthatjuk, amelyek a csúzlihoz vagy parittyához hasonlóan szintén eléggé szemléletesek, de azoknál talán szakszerűbben hangzanak.

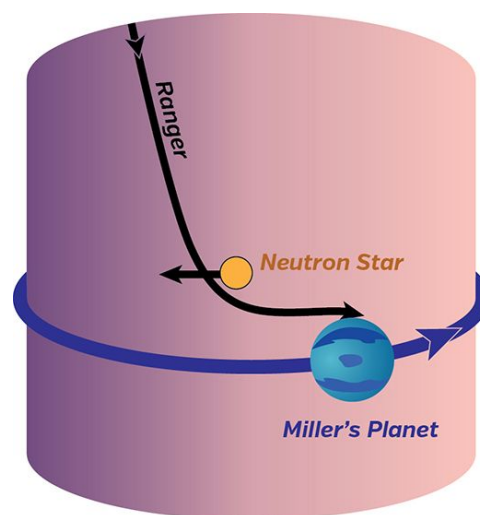
A hintamanőver nem látható a filmben, még csak nem is beszélnek róla, Cooper egyetlen megjegyzése utal csak rá: „Egy parittyával a körül a *neutroncsillag* körül lelassulhatunk” - mondja. A lassításra azért van szükség, mert az *Endurance* pályájától a Miller-pályáig a Gargantua gravitációs terében zuhanva a Ranger túl nagy sebességre tesz szert, $c/4$ -gyel gyorsabban mozog, mint Miller bolygója. A 7.3. ábrán a Miller bolygójához képest balra mozgó neutroncsillag eltéríti és lelassítja a Rangert, így az szépen megközelítheti a bolygót.

7.3. ábra

A neutroncsillag körüli hintamanőver teszi lehetővé Miller bolygójának megközelítését

A hintamanővereknek azonban van egy nem kívánt mellékhatása, ami valójában halálos: az árapályerők (4. fejezet).

$c/3$ vagy $c/4$ nagyságú sebességváltozások eléréséhez a Rangernek elég közel kell mennie a fekete lyukhoz és a neutroncsillaghoz. Ilyen kis távolságban azonban, ha az eltérítő egy neutroncsillag vagy egy 10 000 kilométernél kisebb sugarú fekete lyuk, az árapályerők (4. fejezet) szétszaggatnák a Rangert és a legénységet. Azért, hogy a Ranger is egyben maradjon, és a legénység is túlélje a manővert, a fekete lyuknak legalább 10 000 kilométer nagyságúnak kell lennie (ami nagyjából a Föld méretének felel meg).

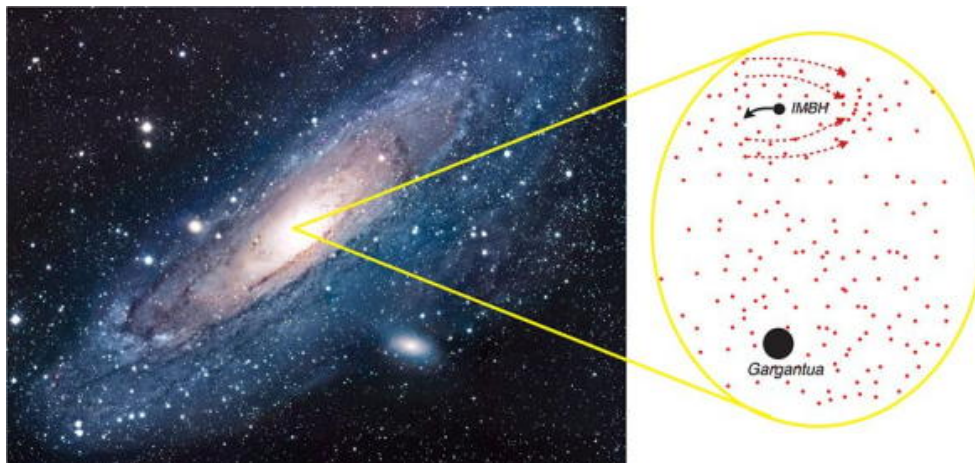


Ilyenek léteznek is, közepes tömegű fekete lyuk a nevük, angol betűszóval IMBH (intermediate-mass black hole). Bár nagyok, de össze sem hasonlíthatók a Gargantuával, annál tízezerszer kisebbek.

Christopher Nolannek tehát egy Föld-méretű IMBH-t kellett volna használnia, hogy lelassítsa a Rangert, nem pedig egy neutroncsillagot. Erről még abban a korai fázisban beszéltem vele, amikor elkezdte átírni Jonah forgatókönyvét. Körülbelül egy órán át tartó vita után Chris mégis a neutroncsillagot választotta. Miért? Nem akarta a közönséget összezavarni azzal, hogy egynél több fekete lyuk van a filmben. Egy fekete lyuk, egy féregjárat, egy neutroncsillag, nem beszélve a *Csillagok között* egyéb tudományos érdekességeiről, és mindez egy kétórás, lendületes filmbe sűrítve. Chris úgy vélte, ennél többet nem bír el büntetlenül a mozi. Felismerve azonban, hogy a Gargantua körüli manőverezéshez erős gravitációs lendítések szükségesek, Chris egyet mégiscsak beépített Cooper szövegébe, annak árán, hogy tudományos szempontból helytelenül a fekete lyukat neutroncsillagra cserélte.

Közepes tömegű fekete lyukak a galaxisok magjában

Ezek azok az eltérítők, amelyekre Coopernek szüksége van. Egy 10 000 km méretű fekete lyuk körülbelül 10 000 naptömegű. Ez tízezerszer kisebb, mint a Gargantua tömege, de ezerszer



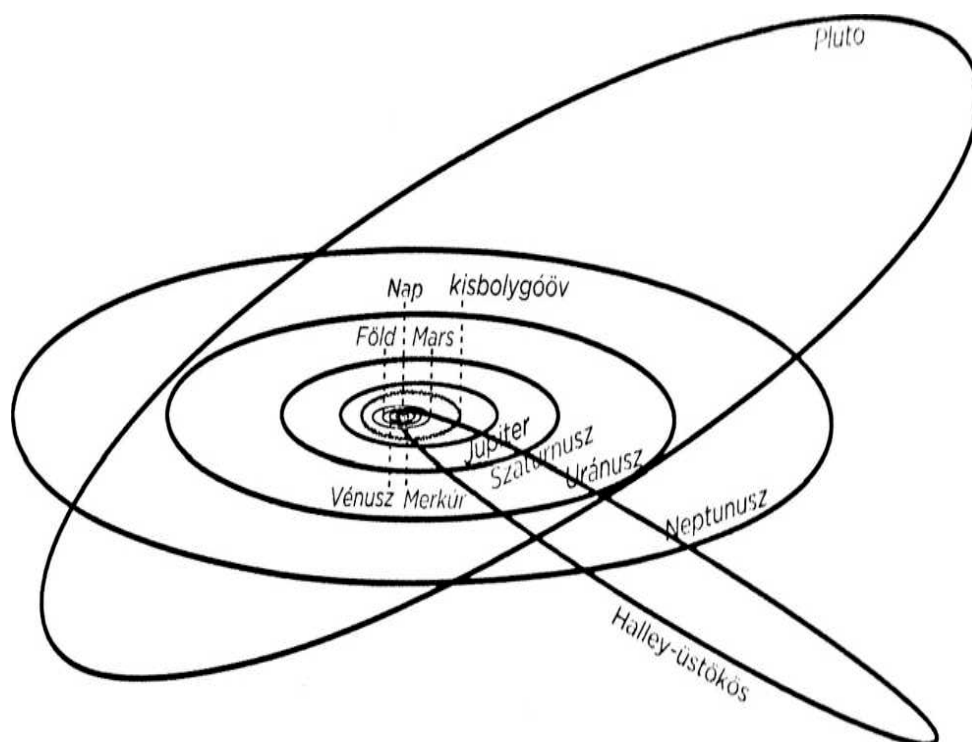
7.4. ábra

Balra: Az Androméda-köd, amelyben egy Gargantua-méretű fekete lyuk található.
Jobbra: A dinamikai súrlódás eredményeként egy IMBH fokozatosan lassulva egyre közelebb kerül az óriási fekete lyukhoz

nagyobb, mint egy tipikus fekete lyuké.

Úgy gondoljuk, hogy az IMBH-k a gömbhalmaznak nevezett sűrű csillaghalmazok magjában is kialakulhatnak, és közülük több utat is találhat a galaxisok centrumába, ahol a gigantikus fekete lyukak uralkodnak.

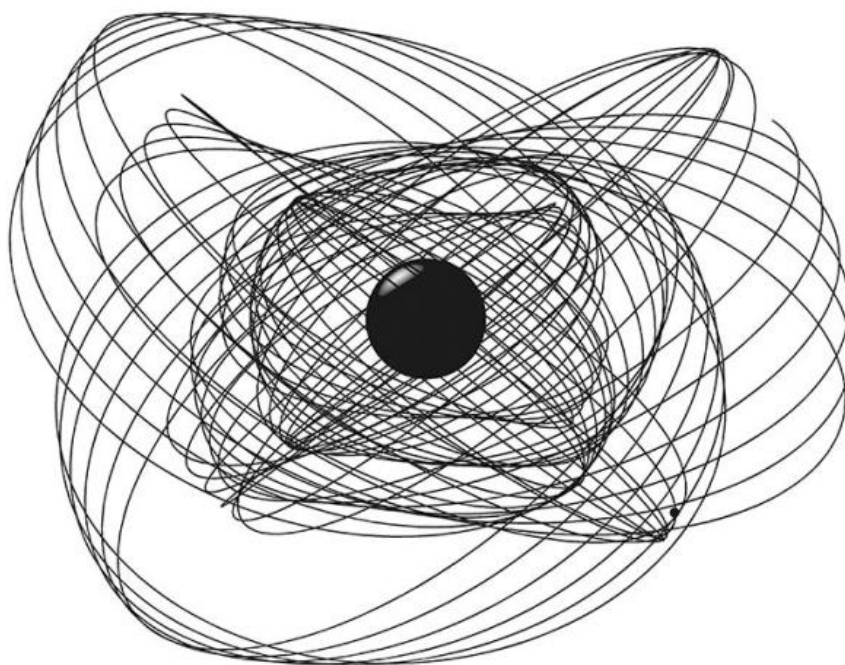
Jó példa erre az Androméda-köd, a hozzánk legközelebbi nagy galaxis (7.4. ábra), amelynek centrumában egy Gargantuához hasonló méretű, 100 millió naptömegű fekete lyuk rejtőzködik. Ezek az óriási fekete lyukak nagyszámú csillagot vonzanak a közelükbe, köbfényévenként akár ezret is. Ha egy IMBH áthalad egy ilyen sűrű régió, gravitációs vonzása eltéríti a csillagokat, és egy csóvába rendezi azokat maga mögött (7.4. ábra). A sűrű csóva azonban gravitációsan visszahat az IMBH-ra, és lelassítja; a folyamat neve „dinamikai súrlódás”. Ahogyan egyre inkább lassul, az IMBH egyre közelebb kerül a központi fekete lyukhoz. Ebben az értelemben, legalábbis az én olvasatomban, a természet közepes tömegű fekete lyukak formájában nyújthatja a Cooper számára szükséges segítséget²⁸.



7.5. ábra.

A bolygók, a Pluto és a Halley-üstökös naprendszerbeli pályái ellipszisek

²⁸ Természetesen kicsi annak a valószínűsége, hogy éppen a szükséges helyen és időben találunk egy IMBH-t, de a sci-fi szellemében, mivel a fizikai törvények által kijelölt határokon belül mozgunk, kiaknázzhatjuk a bennük rejlő lehetőségeket.



7.6. ábra.

Egy űreszköz, bolygó vagy csillag pályája egy Gargantuához hasonló hatalmas, gyorsan forgó fekete lyuk körül [Steve Drasco szimulációjából.]

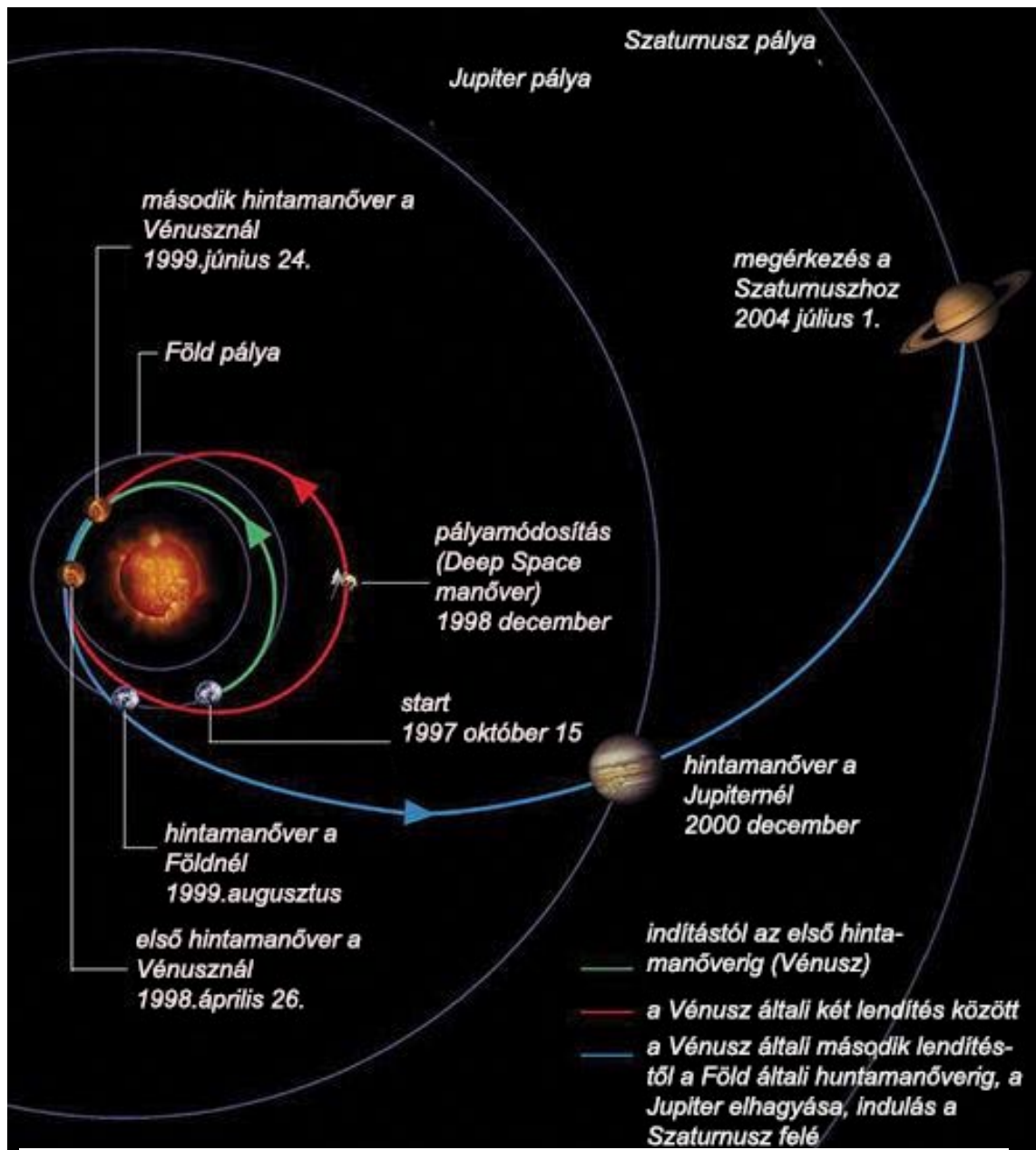
Így manővereznének az ultrafejlett civilizációk: Egy kis kitérő

Naprendszerünkben a bolygók és az üstökösök pályái majdnem tökéletes ellipszisek (7.5. ábra). Newton gravitációs törvénye nemcsak biztosítja, de ki is kényszeríti ezt.

Ezzel szemben a Gargantuához hasonló óriási, forgó fekete lyukak körül, ahol az Einstein-féle relativisztikus törvények irányítanak, a pályák sokkal bonyolultabbak. A 7.6. ábrán láthatunk egy példát. Ezen a pályán a Gargantua körüli minden fordulat néhány óra és néhány nap közötti időt igényelne, így a 7.6. ábra trajektóriájának teljes befutásához körülbelül egy év lenne szükséges. Néhány év elteltével a pálya gyakorlatilag bármelyik kívánt pontba eljutna, bár a sebesség, amellyel megérkeznénk, nem biztos, hogy megfelelő lenne. Valószínűleg egy hintamanőver is kellene a találkozáshoz szükséges sebesség beállításához.

Az olvasóra bízom annak elképzelését, hogy egy ultrafejlett civilizáció hogyan használhatná ezeket a bonyolult pályákat. A film tudományos magyarázata során az egyszerűség kedvéért általában kerülöm ezeket, inkább a kör alakú egyenlítői pályákra fókuszálok (ilyen az *Endurance* parkolópályája, Miller bolygójának pályája és a kritikus pálya), illetve azokra az

egyszerű trajektóriákra, amelyeken az *Endurance* egyik egyenlítői körpályáról egy másikra áll. Egyetlen kivétel Mann bolygójának a 19. fejezetben tárgyalt pályája.



7.7. ábra

A Cassini pályája a Földtől a Szaturnuszig

A NASA hintamanőverei a Naprendszerben

A lehetséges (a fizika törvényei által megengedett) világból térjünk vissza a gravitációs hintamanőverek valódi világába, Naprendszerünk ember által alkotott eszközzel 2014-ig; elért határain belülre.

Talán mindenki hallott már a NASA *Cassini* űrszondájáról (7.7 ábra), amit 1997. október 15-én indítottak a Földről, sokkal kevesebb üzemanyaggal, mint amennyi célja, a Szaturnusz eléréséhez szükséges lenne. A hiányzó üzemanyagot hintamanőverekkel pótolták: 1998. április 26-án és 1999. július 24-én a Vénusz, 1999. augusztus 18-án a Föld, 2000. december 30-án pedig a Jupiter lendített egyet a szondán. A Szaturnusz rendszerébe megérkezve 2004. július 1-jén pedig a bolygó legnagyobb holdja, a Titan lassította le a megfelelő sebességre.

Egyik hintamanőver sem úgy nézett ki, ahogyan korábban leírtam. A radikális irányváltoztatás helyett a Vénusz, a Föld, a Jupiter és a Titan is csak enyhén változtatta meg az űreszköz pályáját. Miért?

A pályamódosítók gravitációs ereje nem elég nagy a pálya alapvető megváltoztatásához. A Vénusz, a Föld és a Titan esetében az eltérítés szükségszerűen kicsi volt gyenge gravitációs terük miatt. A Jupiteré sokkal erősebb, itt viszont arra kellett vigyázni, nehogy az óriásbolygó rossz irányba küldje a *Cassini* űrszondát: a Szaturnusz eléréséhez itt is csak kis eltérítésre volt szükség.

A kis korrekciók ellenére a *Cassini* tekintélyes lendítéseket kapott a hintamanőverek során, elegendően nagyokat, hogy azok kompenzálják az üzemanyag hiányát. A Titan kivételével mindegyik esetben a *Cassini* a bolygó mögött repült el, de olyan szögben, hogy annak gravitációja optimális irányba lendítette és gyorsította a szondát. A *Csillagok között-ben* az *Endurance* hasonló hintamanővert csinál a Marsnál.

Az elmúlt tíz évben a *Cassini* alaposan megvizsgálta a Szaturnuszt, felderítette a holdrendszerét, csodálatos képeket és információkat - szinte kimeríthetetlen kincsestára szépségnek és tudománynak - küldött vissza a Földre.

A Naprendszerben elképzelhető, nem túl nagyot lendítő hintamanőverekkel szemben a Gargantua nagyon erős gravitációs tere rendkívül nagy sebességgel haladó objektumokat is meg tud ragadni és teljesen más irányba téríteni. Még a fénysugarakat is. Így jön létre a gravitációs lencsézés, amelynek kulcsszerepe van abban, hogyan néz ki a Gargantua.

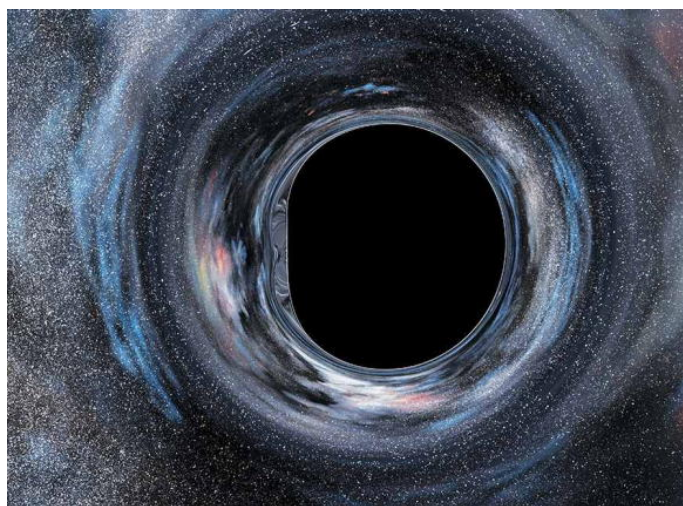
8. A Gargantua megjelenítése



A fekete lyukak nem bocsátanak ki fényt, így a Gargantuát csak más objektumok fényére gyakorolt hatása miatt láthatjuk. A *Csillagok között-ben* ilyenek az akkréciós korong (9. fejezet) és a galaxis, amelyben a fekete lyuk található, gázködeivel és gazdag csillagmezőjével. Az egyszerűség kedvéért most csak a csillagokat vesszük figyelembe.

A Gargantua fekete árnyékot vet a csillagmezőre, és a csillagokból érkező fénysugarakat elhajlítja, eltorzítva ezzel a kamera által látható csillagmintázatot. Ez a torzulás a 3. fejezetben tárgyalt gravitációs lencsézés.

A 8.1. ábra egy gyorsan forgó fekete lyukat (legyen ez, mondjuk, a Gargantua) mutat a mezőcsillagok előtt, ahogyan azt az egyenlítői síkjából láthatnánk. A Gargantua árnyéka a teljesen sötét terület. Kifelé haladva, közvetlenül az árnyék széle mellett van egy nagyon vékony fénygyűrű, az ún. „tűzgyűrű”, amelyet kézzel még hangsúlyosabbá tettem, hogy az árnyék széle jobban elkülönüljön. A gyűrűn kívül koncentrikus héjakba rendeződött sűrű „csillagpermetet” láthatunk, ezt a mintázatot a gravitációs lencsézés hozza létre.



8.1. ábra

A Gargantuához hasonló, gyorsan forgó fekete lyuk körül a gravitációs lencsézés által kialakított csillagmintázat. Messziről nézve az árnyék szögátmérője radianban 9 Gargantua-sugár osztva a megfigyelő Gargantuától mert távolságával. (A Double Negative vizuális effektusokért felelős részlegének készített szimulációjából)

Miközben a kamera a Gargantua körül kering, a csillagmező elmozdul. Ez a mozgás a lencsézéssel kombinálva drámaian megváltoztatja a mintázatot. A csillagok egyes területeken nagy sebességgel áramlanak, más helyeken szelíden hömpölyögnek, és van, ahol befagynak. (Lásd a klipeket a könyv honlapján: <http://Interstellar.withgoogle.com>)

Ebben a fejezetben az összes ilyen jellegzetességet elmagyarázom, az árnyéktól és a tűzgyűrűtől kezdve. Aztán bemutatom, hogy valójában hogyan készültek a fekete lyukat megjelenítő képek a *Csillagok között* számára.

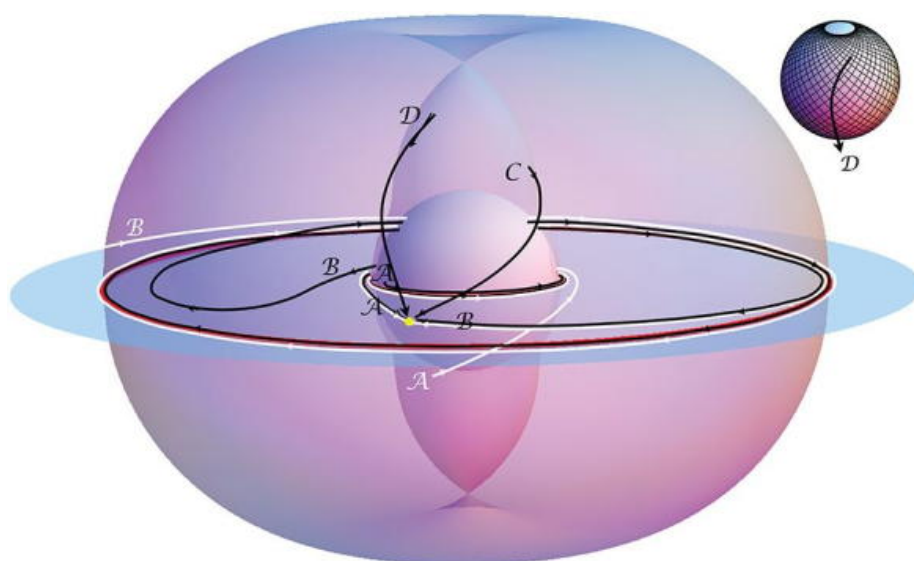
A magyarázatban a Gargantuát egy rendkívül gyorsan forgó fekete lyukként kezeljük, hiszen ilyennek kell lennie az *Endurance* legénysége által tapasztalt, a földihez képesti extrém időlassulás fellépéséhez (6. fejezet). A nagyon gyors forgás miatt azonban a Gargantua árnyékának bal oldala elég lapos lenne (8.1. ábra), de a csillagáramok és a tömegbefogási korong is furcsán nézne ki, ami

a nézőket megzavarhatná, ezért Christopher Nolan és Paul Franklin a Gargantua filmbeli megjelenítéséhez lényegesen kisebb forgási ütemet választott, a maximális érték 60 százalékát. A részleteket lásd a 9. fejezet végén.

Figyelmeztetés: A következő három részben olvasható magyarázatok sok gondolkodást igényelhetnek, ezért nyugodtan átugorhatok. Nem kell azonban aggódni, a könyv további részei enélkül is érthetőek.

Az árnyék és a tűzgyűrűje

A tűzburok (6. fejezet) kulcsszerepet játszik a Gargantua árnyéka és a körülötte húzódó tűzgyűrű kialakulásában. A 8.2. ábrán a bíbor színű terület a Gargantuát körbeölelő tűzburok, amely a majdnem csapdába esett fotonok pályáiból (fénysugarak) áll, olyanokból, mint ami a jobb felső sarokban látható²⁹.



8.2. ábra

A Gargantua (centrális szferoid), az egyenlítői síkja (kék) és a tűzburka (bíbor és lila), illetve a fekete és a fehér fénysugarak, amelyek az árnyék és az azt körbefutó vékony gyűrű képét előállítják

Tegyük fél, hogy a sárga ponttal jelölt pozícióban vagyunk. A tűzgyűrű képét a fehér A és B, míg az árnyékét a fekete A és B típusú fénysugarak állítják elő. A fehér A sugár például induljon egy, a Gargantuától távol elhelyezkedő csillagból. Ez befelé halad, csapdába esik a Gargantua egyenlítői síkja körüli tűzburok belső szélén, ahol a tér örvénylése miatt egy ideig

²⁹ Lásd még a 6.4. és a 6.5. ábrát.

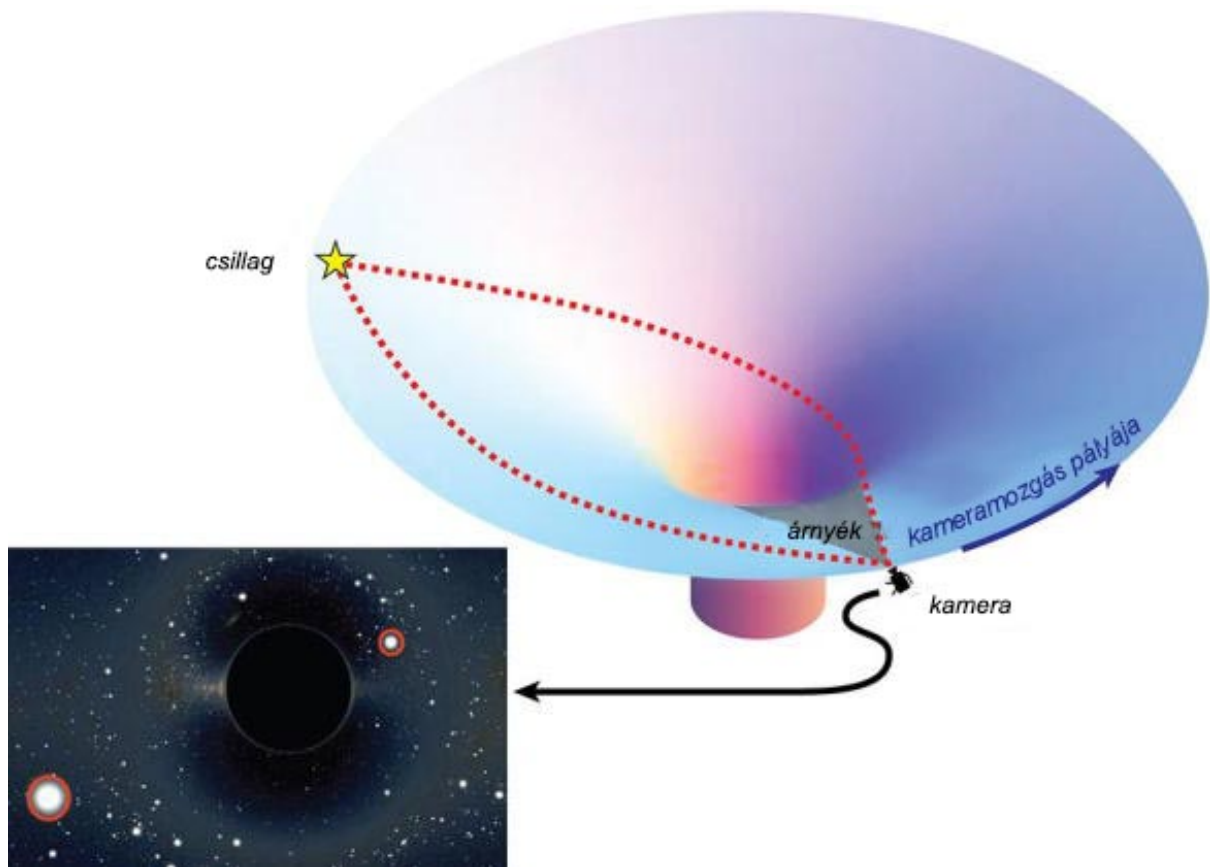
körbe-körbe utazik, majd elszökik, és a szemünkbe jut. A szintén A -val jelölt fekete sugár a Gargantua eseményhorizontjáról indul, kifelé halad, és szintén csapdába esik a tűzburok belső szélén, ugyanúgy körbejár, elszökik, majd a fehér A sugár mellett eléri a szemünket. A fehér sugár a vékony gyűrű, a fekete pedig az árnyék széle egy részének képét állítja elő. A tűzburok gyűjti össze a fénysugarakat, és irányítja a szemünkbe azokat.

A fekete és fehér B sugarak hasonlóan viselkednek, azzal a különbséggel, hogy azok a tűzburok külső szélén esnek csapdába, és az óramutató járásával megegyező irányban (a tér örvénylésével szemben) járnak körbe, míg az A sugarak a belső szélén az óramutató járásával ellentétesen (a térörvény által is hajtva) mozognak. Az árnyék bal szélének 8.1. ábrán látható belapulása és a jobb szélének kerek alakja a tűzburok belső széléről, a horizont közeléből érkező A sugaraknak (bal szél), illetve a tűzburok külső széléről, a horizonttól sokkal távolabbról induló B sugaraknak (jobb szél) köszönhető.

A 8.2. ábra fekete C és D sugarai a horizontról indulnak és kifelé haladnak, csapdába esnek a tűzburok nemegyenlítői pályáin, majd onnan elszökve jutnak a szemünkbe, és állítják elő az árnyék szélének egyenlítői síkon kívül eső képeit. A jobb felső sarokban látható kis kép egy D sugaras csapdapályát mutat. A távoli csillagokból induló fehér C és D sugarak (nem szerepelnek az ábrán) a fekete C és D sugarak mellett esnek csapdába, majd szintén azok mentén jutnak a szemünkbe, és állítják elő az árnyékszél részei melletti tűzgyűrűívek képeit.

Nem forgó fekete lyuk gravitációs lencsézése

Azért, hogy megérthessük az árnyékon kívüli csillagmező gravitációs lencsézéssel létrejött mintázatát és a csillagok kameramozgas miatti áramlását, először tekintsünk egy nem forgó fekete lyukat és egyetlen csillagból kiinduló fénysugarakat (8.3. ábra). A kamerához két sugár érkezik a csillagból. Mindegyik a lehető legrövidebb úton halad keresztül a lyuk görbült terén, de a görbület miatt ezek a trajektóriák elhajlanak.



8.3. ábra

Felül: Egy nem forgó fekete lyuk körüli görbült tér a befoglaló térből nézve és két fénysugár, amelyek a görbült téren keresztül jutnak egy csillagból a kamerába.

Alul: A kamera által látott, gravitációs lencsézéssel leképezett csillagmező

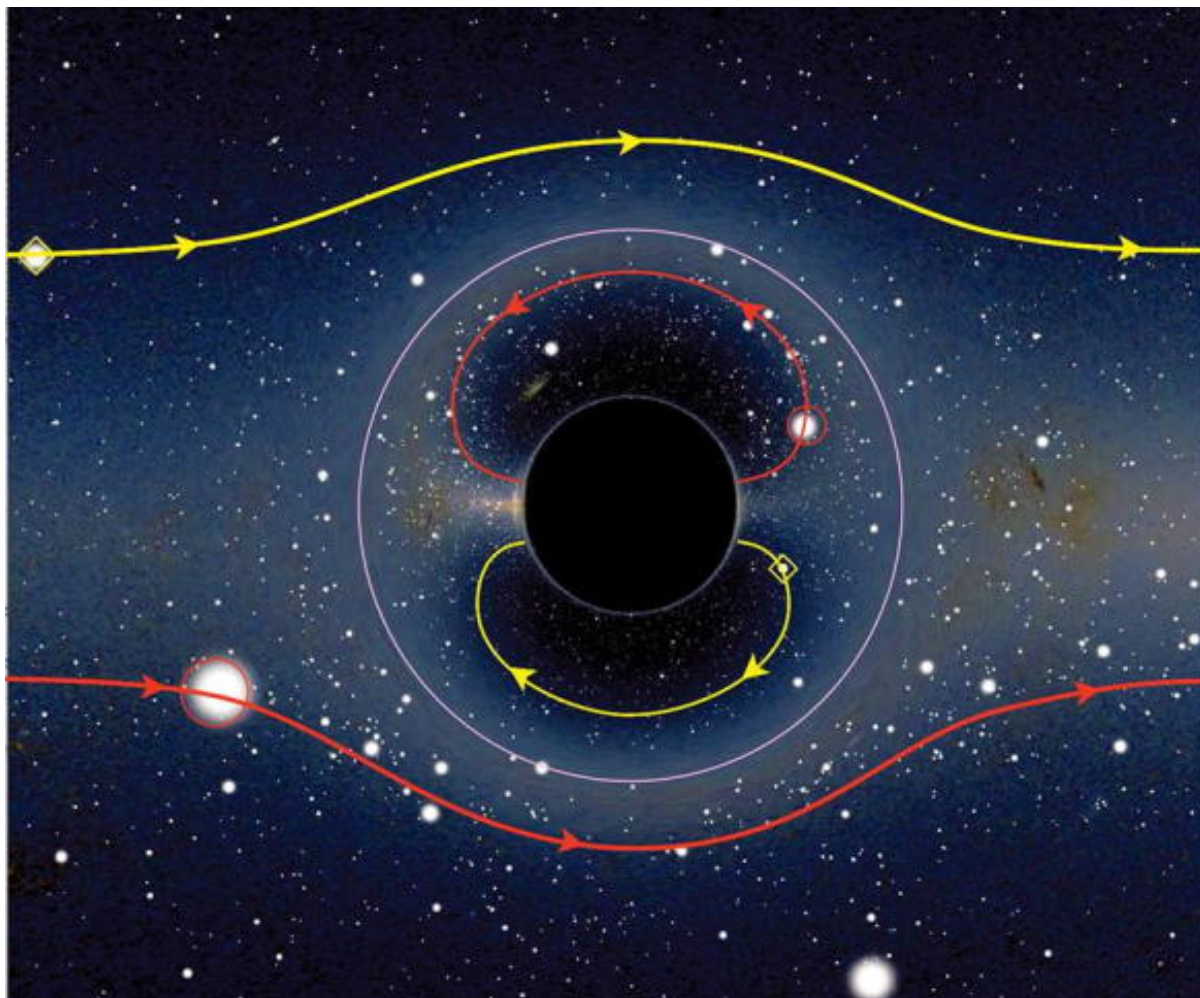
[Alain Riazuelo szimulációjából. A teljes kilipp itt található: <http://www2.iap.fr/users/riazuelo/interstellar/index.php>]

Az egyik elhajlított fénysugár a fekete lyuk bal, a másik pedig a jobb oldaláról érkezik a kamerába, ahol mindegyik előállítja a csillag egy-egy képét. A kamera által látottakat a 8.3. ábra kis képe mutatja. Mindkettőt vörös körrel karikáztam be, hogy meg tudjuk különböztetni azokat a többi csillagtól. Látható, hogy a jobb oldali kép sokkal közelebb van a lyuk árnyékához, mint a bal oldali kép. Ennek oka az, hogy elhajlított fénysugara közelebb haladt a lyuk eseményhorizontjához.

Minden csillag kétszer jelenik meg a képen, a lyuk árnyékának ellentétes oldalain. Próbáljunk meg azonosítani néhány párt! A fekete lyuk árnyékát azok az irányok jelölik ki, ahonnan nem érkezik fénysugár a kamerába, ez a háromszög alakú „árnyék” felirattal megjelölt terület a felső diagramon. Az árnyékba eső minden fénysugarat elnyel a fekete lyuk.

Ha a kamera jobbra mozog a 8.3. ábrán látható pályán, az általa mutatott kép a 8.4. ábrán látható módon változik.

A képen két csillagot jelöltem meg, az egyiket vörös körrel (ez ugyanaz, mint a 8.3. ábrán), a másikat pedig sárga rombuszsal. Minden csillagnak két képét látjuk: az egyik a rózsaszín körön kívül, a másik pedig azon belül van. A rózsaszín kör neve „Einstein-gyűrű”.



8.4. ábra

A kamera által látott csillagmező változása, miközben a kamera a 3.3. ábrán látható pálya mentén jobbra mozog

[Alain Riazuelo szimulációjából. <http://www2.iap.fr/users/riazuelo/interstellar/index.php>]

A kamera jobbra tartó mozgása közben a csillagok képei a sárga és a vörös görbék mentén mozognak.

A csillagok Einstein-gyűrűn kívüli képei (nevezzük ezeket elsőrendű képeknek) abba az irányba mozognak, amerre azt várnánk is; méltóságteljesen balról jobbra, de a fekete lyuktól távolodva a mozgás közben. (Próbáljuk meg kitalálni, hogy miért távolodnak a lyuktól, ahelyett, hogy közelednének felé.)

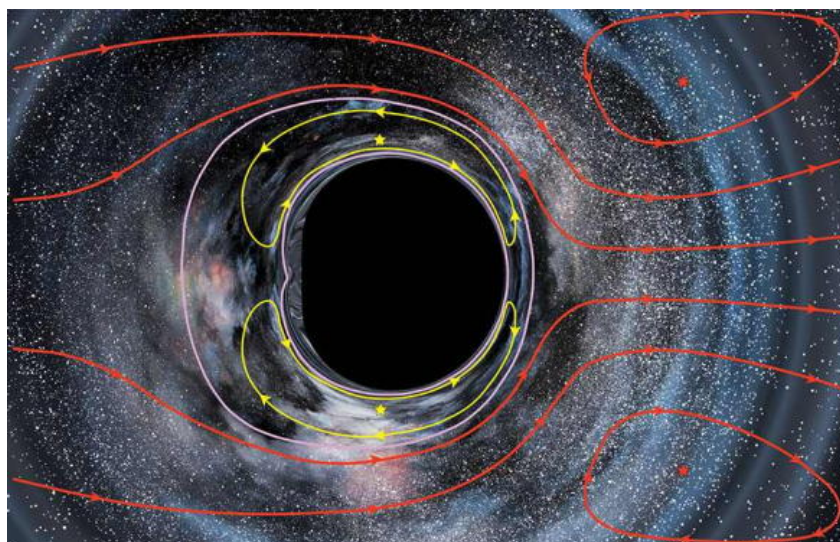
Az Einstein-gyűrűn belüli másodrendű képek azonban nem várt módon mozognak: Az árnyék jobb szélénél jelennek meg, az árnyék és az Einstein-gyűrű közötti részben kifelé mozognak, balra forognak az árnyék körül, majd újra az árnyék széle felé haladva tűnnek el.

Ezt a viselkedést a 8.3. ábra felső rajzának alapján érthetjük meg. A jobb oldali fénysugár a fekete lyuk közelében halad, így az általa létrehozott kép az árnyék közelében lesz. Korábban, amikor a kamera még ettől a pozíciótól balra járt, a jobb oldali fénysugár még közelebb került a fekete lyukhoz, azaz nagyobb elhajlás után érte el a kamerát, így a jobb oldali kép is közelebb volt az árnyék széléhez. Ezzel ellentétben ugyanekkor a bal oldali sugár a lyuktól messze haladt, majdnem egyenesen, így a kép is jóval távolabb keletkezett az árnyéktól.

Gondoljuk át a 8.4. ábrán látható képek további mozgását is.

Gyorsan forgó fekete lyuk gravitációs lencsézése: Gargantua

A térnek a Gargantua nagyon gyors forgása miatti felcsavarodása megváltoztatja a gravitációs lencsézéssel előállt képeket. A 8.1. ábrán látható csillagmintázat (Gargantua) kicsit különbözik a 8.4. ábrától (nem forgó fekete lyuk), az áramlási minták pedig még inkább eltérnek.



8.5. ábra

A csillagok képeinek áramlási mintázata, ahogyan egy Gargantuához hasonló, gyorsan forgó fekete lyuk körül látja a kamera. A Double Negative vizuális effektusokért felelős részlege által készített szimulációban a fekete lyuk a lehetséges legnagyobb sebesség 99,9 százalékával forog, a kamera pedig egyenlítői körpályán mozog körülötte, amelynek kerülete hatszorosa a horizonténak. A teljes szimuláció a könyv honlapján (<http://Interstellar.withgoogle.com>) érhető el.

A Gargantua esetében az áramlás (8.5. ábra) két Einstein-gyűrűt fed fel. A külső gyűrűn kívül a csillagok jobbra mozognak (például a vörös görbék mentén), ugyanúgy, mint a nem forgó

fekete lyuk esetében a 8.4. ábrán. A tér sodrása azonban az áramokat keskenyebb, nagy sebességű sávokba koncentrálja a lyuk árnyékának hátsó széle mentén, amelyek aztán az egyenlítőnél élesen elhajolnak. A sodrás örvényeket is kelt az áramlásban (zárt vörös görbék).

A csillagok másodrendű képei a két Einstein-gyűrű között jelennek meg. Minden másodrendű kép egy zárt görbe mentén (ilyen például a sárga) ellenkező irányban cirkulál, mint a külső gyűrűn kívüli vörös áramlás.

A Gargantua egén két különleges csillag is van, amelyekre nem hat a gravitációs lencsézés. Az egyik éppen a Gargantua északi pólusa felett, a másik pedig a déli pólusa alatt. Ezek a Sarkcsillag (Polaris; megfelelői, ami a Föld északi pólusa felett helyezkedik el³⁰. Ötágú csillagokkal jelöltem a Gargantua sarkcsillagainak elsőrendű (vörös) és másodrendű (sárga) képeit. Bolygónk forgásának tükörképeként a Föld egén az összes csillag a Polaris körül látszik körbejárni. Ehhez hasonlóan a csillagok Gargantua által előállított összes elsőrendű képe a vörös póluscsillag körül forog, amint a kamera halad a lyuk körül, cirkulációs pályáikat (például a két zárt vörös görbét) azonban nagymértékben eltorzítja a tér sodrása és a gravitációs lencsézés. A másodrendű képek pedig a sárga póluscsillag körül forognak (például a két torzult sárga görbe mentén).

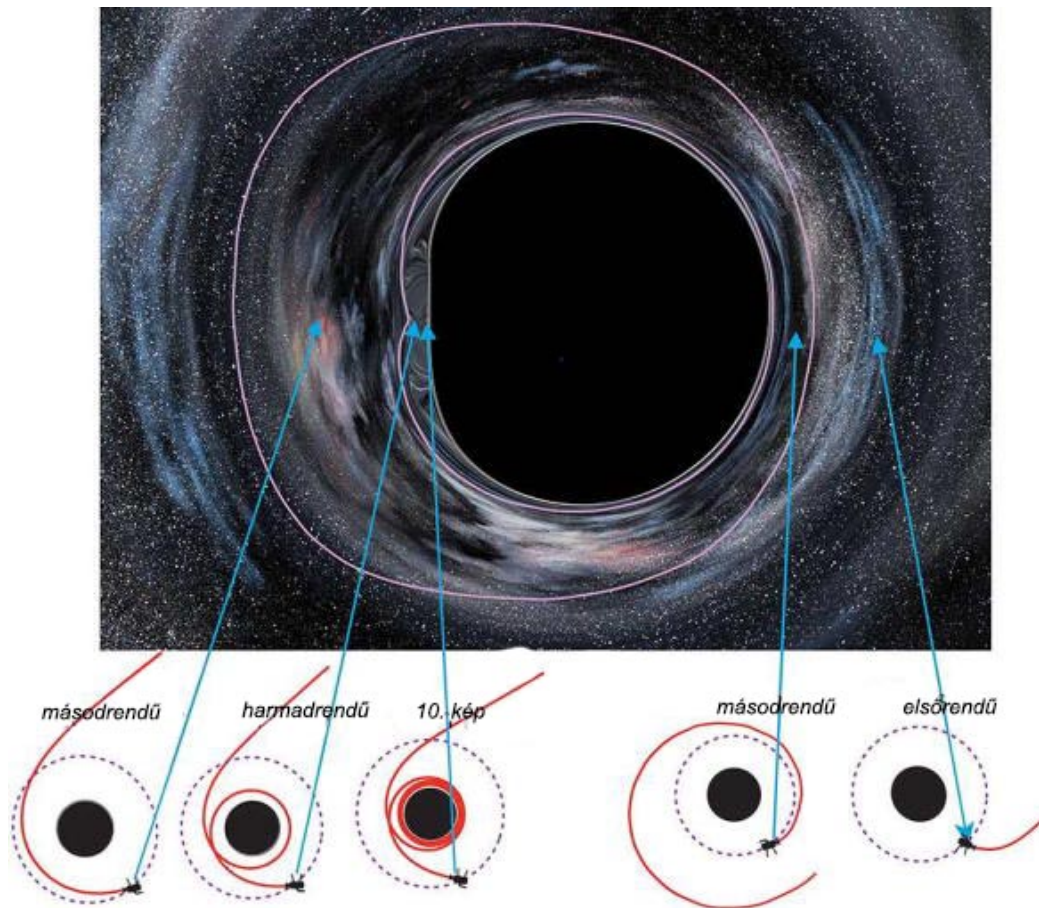
Miért van az, hogy a nem forgó fekete lyuk esetében (8.4. ábra) a másodrendű képek a fekete lyuk árnyékából tűnnek fel, körbejárnak a lyukat, majd a másik oldalon újra az árnyékba merülnek, ahelyett, hogy egy zárt görbe mentén járnának körbe, mint a Gargantua esetében (8.5. ábra)? Valójában a nem forgó fekete lyuk esetében is *ugyanúgy* zárt görbék mentén mozognak, csak ezek belső széle olyan közel van az árnyék széléhez, hogy már nem is látható. A Gargantua forgása azonban megcsavarja a teret, ami a belső Einstein-gyűrűt kifelé mozdítja, láthatóvá téve ezáltal a másodrendű képek teljes cirkulációs pályáját (sárga görbék a 8.5. ábrán) és a belső Einstein-gyűrűt is.

A belső Einstein-gyűrűn belül az áramlási mintázat még ennél is bonyolultabb. Az itt látható csillagok az univerzum összes csillagának - a külső Einstein-gyűrűn kívül elsőrendűként, az Einstein-gyűrűk között másodrendűként megjelenő - harmad- és még magasabb rendű képei.

A 8.6. ábrán a Gargantua egyenlítői síkjának öt kis képét láthatjuk. Magát a Gargantuát fekete kör, a kamera pályáját bíborszínű szaggatott, egy fénysugárét pedig vörös vonal jelöli. A fénysugarak által létrehozott kép helyét a kék nyilak mutatják. A kamera az óramutató járásával ellentétes irányban kering a Gargantua körül.

³⁰ A Sarkcsillag valójában körülbelül fél fokra – ez a telihold látszó átmérőjének felel meg – megtalálható az északi pólustól.

A képek tanulmányozásával saját magunk is sok mindent megtudhatunk a gravitációs lencsézésről. Ne felejtjük el a következőket: A csillag valódi iránya felfelé és jobbra van (lásd a vörös sugár külső részét). A kamera és minden sugár kezdete a csillag felé mutat. A 10. kép nagyon közel van az árnyék bal széléhez, a jobb oldali másodrendű kép pedig a jobb széléhez. A képek kamerairányait összehasonlítva láthatjuk, hogy az árnyék körülbelül 150 foknyira terjed ki felfelé. Annak ellenére, hogy a kamerát és a Gargantua középpontját összekötő irány valójában balra és felfelé mutat. A lencsézés elmozdította az árnyékot a



8.6. ábra

A kék nyilak hegyénél lévő csillagok képeit előállító fénysugarak.
[Ugyanabból a Double Negative-szimulációból, mint a 8.1. és a 8.5. ábrák]

Gargantua valódi irányához képest.

A Csillagok között fekete lyukas és féregjáratos vizuális effektusainak előállítása

Chris azt akarta, hogy a Gargantua olyan legyen, amilyenek közelről egy forgó fekete lyukat valójában látnánk, ezért arra kérte Pault, hogy konzultáljon velem. Paul összehozott azzal a csapattal, amelyet a vizuális effektusok előállításával foglalkozó, Double Negative nevű, Londonban működő cégében a *Csillagok között* munkálataira összeállított.

Közvetlenül Oliver James vezető kutatóval álltam munkakapcsolatban. Oliver és én telefonon, skype-on, e-mailben és fájlok cseréjével tartottuk a kapcsolatot, de személyesen is találkoztunk Los Angelesben és a londoni irodájában is. Oliver optikából és atomfizikából szerzett diplomát, és tisztában volt Einstein relativitáselméletével, szóval ugyanazt a szaknyelvet beszéltük.

Több fizikus kollégám is készített már számítógépes szimulációkat arról, hogy mit látnánk egy fekete lyuk körül keringve, vagy éppen belezuhanva egybe. A téma két legjobb szakértője Alain Riazuelo (Institut d'Astrophysique, Paris) és Andrew Hamilton (University of Colorado, Boulder). Andrew készítette azokat a fekete lyukas filmeket, amelyekkel világszerte találkozhatunk a planetáriumokban, Alain pedig a Gargantuához hasonlóan hatalmas sebességgel forgó fekete lyukakat szimulálta.

Először tehát úgy gondoltam, hogy Olivert Alainhez és Andrew-hoz irányítom, hogy tőlük szerezzék meg a szükséges adatokat. Ezen döntésem azonban néhány kellemetlen napot okozott számomra, így változtattam a terven.

Fél évszázados fizikuspályám során sok energiát fordítottam arra, hogy saját magam fedezzek fel új dolgokat, és a tanítványaimat is erre ösztönözzem. Miért ne csinálhatnék valamit csak a szórakozás kedvéért, tettem fel a kérdést magamnak, még akkor is, ha mások már megcsinálták előttem. Rászántam magam, és tényleg jól szórakoztam. Meglepetésemre melléktermékként ráadásul (szerény) új felfedezések is születtek.

Einstein relativisztikus törvényei alapján, mások - különösen Brandon Carter (Laboratoire Univers et Théories, Franciaország) és Janna Levin (Columbia University) - korábbi munkáit is felhasználva, kidolgoztam azokat az egyenleteket, amelyekre Olivernek szüksége volt. Ezek írják le, hogy egy távoli forrásból, például egy csillagból kiinduló fénysugár hogyan halad át a Gargantua görbült terén és idején, majd jut el a kamerába. Segítségükkel kiszámoltam, hogy a fénysugarak milyen képeket állítanak elő a kamerában, nemcsak a fényforrásokat és a Gargantua tér- és időgörbületét, de a kamera mozgását is figyelembe véve.

Az egyenletek birtokában a Mathematica nevű, felhasználóbarát számítógépes programba kódoltam azokat. A Mathematica-kódommal előállított képeket összevetettem Alain Riazuleo képeivel, és ha egyeztek, nagyon örültem. Ezután részletesen leírtam, hogy mit csinálnak az egyenleteim, majd a Mathematica-kóddal együtt elküldtem azt Olivernek Londonba.

Sajnos az én kódomban lassú volt, és csak kis felbontású képeket lehetett generálni vele. Az egyenletekből Olivernek kellett olyan kódot írnia, amely már alkalmas a hímhez szükséges ultranagy felbontású IMAX-képkockák előállítására is.

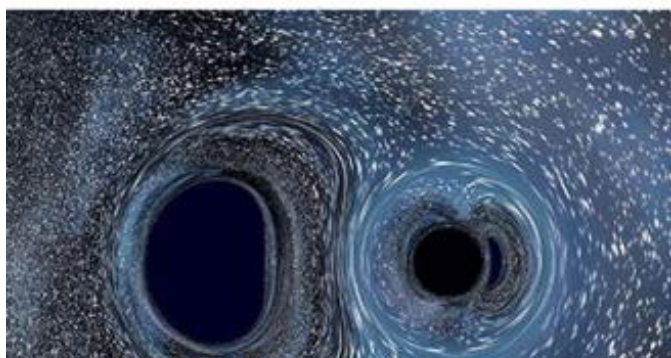
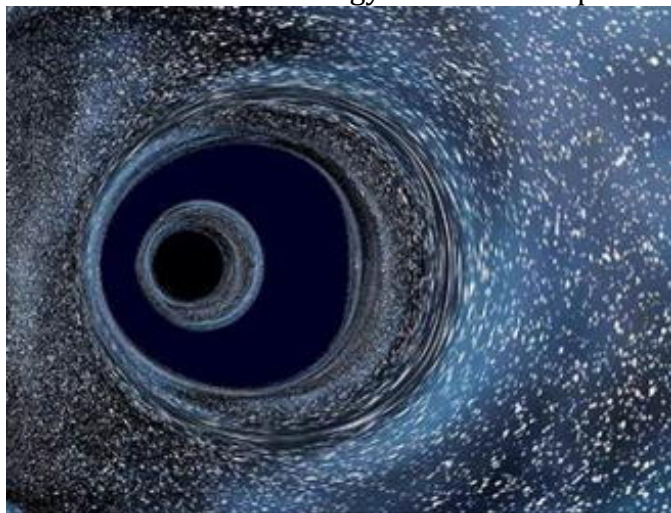
Oliver és én lépésenként oldottuk meg a feladatot. Nem forgó fekete lyukkal és nem mozgó kamerával kezdtünk. Azután hozzáadtuk a fekete lyuk forgását. Aztán a kameramozgást: először a körpályán való keringést, majd a lyukba zuhanást. A végén pedig a féregjárat körül mozgó kamerára váltottunk.

Ennél a pontnál Oliver egy kisebbtájta szőnyegbombázást intézett ellenem: Néhány további effektus modellezéséhez nemcsak a fénysugarak trajektóriáit megadó egyenletekre lett volna szüksége, hanem arra is, hogy a fénynyalábok keresztmetszetének mérete és alakja hogyan változik, miközben elhaladnak a fekete lyuk közelében.

Többé-kevésbé tudtam, mit kellene kezdenem a problémával, de a formulák borzasztóan bonyolultak voltak, és attól tartottam, hibát ejtek. Ezért átnéztem a szakirodalmat. Kiderült, hogy Serge Pineault és Rob Roeder (University of Toronto) 1977-ben már meghatározták a szükséges egyenleteket, majdnem abban a formában, ahogyan nekem kellett. Saját ostobaságommal folytatott háromhetes küzdelem után az egyenleteket sikerült pontosan a szükséges alakra hoznom. Az eredményt leprogramoztam a Mathematicában, majd elküldtem Olivernek, aki beillesztette saját számítógépes kódjába, amivel aztán végre olyan képminőséget lehetett produkálni, amelyet a film megkívánt.

A Double Negative-nél Oliver számítógépes kódja azonban csak a kezdet volt. Annak eredménye ugyanis az Eugénie von Tunzelmann által vezetett művészeti részleg kezébe került, akik hozzáadták az akkréciós korongot és a háttérgalaxist gázködeivel és csillagaival egy ütt, mindazt, aminek gravitációsan lencsézett képét a Gargantua előállította. Ezután került a kockákra az *Endurance*, a Rangerek, a leszállóegységek és a kameramozgás (irány, látómező stb.) animációja, illetve azok az effektusok, amelyek eredményeként a képkockák elnyerték a filmben látható végső formájukat. Erről további részletek a 9. fejezetben olvashatók.

Én közben azokat a nagy felbontású klipeket nézegettem, amelyeket Oliver és Eugénie küldött



8.7. ábra

Egy közepes méretű fekete lyuk körüli hintamanőver, háttérben a Gargantuával. [Saját szimuláció, és megjelenítem]

át nekem, azon töprengve, hogy a képek miért úgy néznek ki, ahogyan kinéznek, és a csillagmezők miért úgy áramolnak, ahogyan áramolnak. Számomra ezek a klipek olyanok voltak, mint a kísérleti adatok: olyan dolgokat mutattak meg, amelyeket saját magamtól, a szimulációk nélkül soha nem találhattam volna ki — ilyenek például az előző részben leírtak (8.5. és 8.6. ábra). Tervezzük is, hogy egy vagy több szakcikkben leírjuk az általunk felfedezett újdonságokat³¹.

A gravitációs lendítés megjelenítése

Bár Chris végül úgy döntött, hogy egyáltalán nem szerepeltet a hímben hintamanővert, én kíváncsi voltam, hogy Cooper a Ranger pilótájaként mit láthatna Miller bolygója felé repülve. Ezért az egyenleteim és a Mathematica segítségével szimuláltam a repülést, és előállítottam a képeket. (Ezek felbontása a kódom lassúsága miatt meg sem közelíti Oliver és Eugénie képeinek felbontását.)

A 8.7. ábra képsorozata azt mutatja, hogy Cooper mit láthatott, miközben a Ranger egy közepes tömegű tekete lyuk (IMBH) körül keringett, hogy Miller bolygója felé lendüljön. Ez a 7.2. ábrán bemutatott manőver.

³¹ A tervezett cikkek közül kettő már meg is jelent: (1) *Gravitational lensing by spinning black holes in astrophysics, and in the movie Interstellar*. Oliver James et al., *Classical and Quantum Gravity* 32 065001 (2015), <http://iopscience.iop.org/0264-9381/32/6/065001>

A felső képen a háttérben a Gargantua látható, előtte pedig éppen elhalad a közepes tömegű fekete lyuk. Az IMBH megragadja a Gargantua irányában elhelyezkedő távoli csillagokból érkező fénysugarakat, megtekeri azokat saját maga körül, majd a kamera felé löki. Ez magyarázza az IMBH árnyékát fánk alakban körülvevő képmezőt. Az IMBH ugyan ezerszer kisebb, mint a Gargantua, de annál jóval közelebb is van a Rangerhez, ezért csak kicsit látszik kisebbnek.

Amint az IMBH az éppen lendülő kamera szemszögéből nézve jobbra mozog, maga mögött hagyja a Gargantua elsőrendű árnyékát (a 7.8. ábra középső képe), és előállítja maga előtt a Gargantua árnyékának másodrendű képét. Ez a két kép teljes mértékben megfelel a fekete lyuk által gravitációsan lencsézett csillagok első- és másodrendű képeinek, csak most a Gargantua árnyéka az, amit az IMBH leképez. Az alsó képen a másodrendű árnyék már összenyomódik, amint az IMBH tovább mozog előre. Eddigre a hintamanőver már majdnem befejeződött, és a Ranger fedélzetén elhelyezkedő kamera már lefelé, Miller bolygójára irányul.

Ezek a képek természetesen csak az IMBH és a Gargantua közeléből lennének láthatók ebben a lenyűgöző formájukban, a Föld távolságából nem. A földi csillagászok számára egy gigantikus fekete lyuk körül zajló folyamatokból a leglátványosabbak a lyuk körül keringő forró gáz fényes tömegbefogási korongja és az ennek síkjára merőleges anyagkilövellések. Ezekkel folytatjuk.

9. Korongok és kilövellések



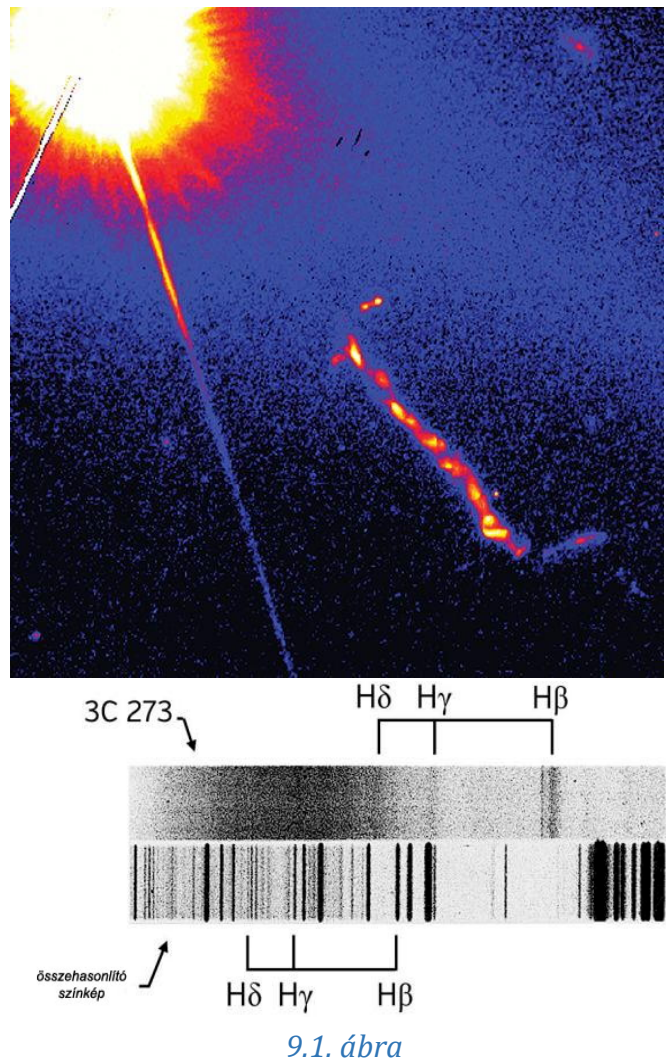
A rádióteleszkópokkal megfigyelhető legtöbb objektum a csillagoknál sokkal nagyobb gázfelhő. Az 1960-as évek elején azonban találtak néhány egészen apró forrást is, amelyek a csillagászoktól a *kvazár* nevet kapták (*quasar* - quasi-stellar radio source - csillagszerű rádióforrás).

1962-ben Maarten Schmidt, a Caltech csillagásza a világ akkori legnagyobb optikai távcsövével, a Palomar-hegyi 5 méteres teleszkóppal látható sugárzást detektált a 3C273 katalógusjelű kvazár irányából. Az objektum fényes csillagnak nézett ki, amelyből egy halvány anyagáram indul (9.1. ábra). Hátborzongató volt!

Amikor Schmidt színeire bontotta a 3C273 tényét és rögzítette a spektrumot, a 9.1. ábra alsó részén látható színeképvonalakat látta. Első pillantásra nem emlékeztette semmilyen színeképvonal-sorozatra, amellyel addig találkozott. Néhány hónapnyi töprengés után, 1963 februárjában azonban rájött, hogy a színeképvonalak azért nem voltak ismerősek, mert a hullámhosszuk a laboratóriumban mérhetőnél 16 százalékkal nagyobb. Az ún. Doppler-eltolódást az okozta, hogy a kvazár a fénysebesség 16 százalékaival (kb. $c/6$) távolodik a Földtől. Mi lehet az oka ennek a rendkívül gyors mozgásnak? A legkevésbé örült magyarázat, amit Schmidt el tudott képzelni, az univerzum tágulása volt.

A világegyetem általános tágulása miatt a Földhöz közelebbi objektumok kisebb, a távolabbiak nagyobb sebességgel távolodnak. A 3C273 óriási sebessége, a fénysebesség hatoda, azt jelentette, hogy a 3C273 körülbelül 2 milliárd fényévre van a Földtől, azaz abban az időben az egyik legtávolabbi ismert objektum volt. Fényességéből és távolságából Schmidt úgy becsülte, hogy a 3C273 négybilliószor annyi energiát bocsát ki, mint a Nap, és százszor többet, mint a legfényesebb galaxisok!

Ez a hihetetlen teljesítmény azonban hónapos időskálán ingadozott, azaz az energia nagy részének egy olyan kicsi térrészből kellett származnia, amekkorát a fény egy hónap alatt be tud járni, ez pedig sokkal kisebb a hozzánk legközelebbi csillag, a Proxima Centauri távolságánál. Más, nagyságrendileg ugyanekkora teljesítményű kvazárok energiakibocsátásának intenzitása pedig még ennél is rövidebb, mindössze néhány órás időskálán fluktuált, így azok nem lehettek nagyobbak a Naprendszerénél. *Egy fényes galaxisénál százszor nagyobb teljesítmény a Naprendszerénél kisebb területről, ez egyszerűen fenomenális volt!*



9.1. ábra

Fent: A Hubble-űrtávcső felvétele a 3C273 kvazárról. A csillag [fent balra] azért tűnik olyan nagynak, mert a képe túlexponált, hogy a halvány kilövellés [lent jobbra] jobban látható legyen. Valójában olyan kicsi hogy a szögátmérője nem is mérhető. Lent: A 3C273 Maarten Schmidt által rögzített spektruma [felső] és a hidrogén laboratórium - összehasonlító színekép -A kvazár spektrumában látható három vonal ugyanaz, mint az összehasonlító színekép H β , H γ és H δ vonalai, a hullámhosszuk azonban 16 százalékkal nagyobb. (A spektrumok üveglemezre készültek, ezért negatívak, azaz a sötét vonalak valójában fényesek)

Fekete lyukak és akkréciós korongok

Hogyan keletkezhet ilyen nagy mennyiségű energia ilyen kicsi térrészben? A természet alapvető kölcsönhatásait figyelembe véve három dologra gondolhatunk: kémiai, nukleáris és gravitációs energiára.

Kémiai energia a nevének megfelelően olyan kémiai reakciókban szabadul fel, amelyekben atomokból, molekulákból más molekulák keletkeznek. Ilyen például a benzin égése, amelyben

a szénhidrogén- és oxigénmolekulákból víz és szén-dioxid képződik, miközben nagy mennyiségű hő szabadul fel. Ez azonban egészen-egészen messze van a szükségestől.

Nukleáris energia akkor szabadul fel, ha atommagok hasadnak vagy egyesülnek új atommagokat létrehozva. Példa rá az atom- és a hidrogénbomba, vagy a csillagok belsejében zajló termionukleáris reakciók. Kár ez már sokszorosa a kémiai reakciókban felszabaduló energiáknak (gondoljunk csak a berobbanó benzin égése és a hidrogénbomba közötti különbségre), az asztrofizikusok nem találták kézenfekvő módját annak, hogyan biztosíthatná a kvazárok által kisugárzott teljesítményt. Ehhez még mindig csekély volt.

Nem maradt más lehetőség, mint a *gravitációs energia*, ugyanaz, ami az *Endurance*-t mozgatta a Gargantua körül. Az *Endurance* egy közepes tömegű fekete lyuk gravitációs lendítését használta ki (7. fejezet). A kulcs a fekete lyuk erős gravitációs tere volt. Az energia forrását a kvazárok esetében is a fekete lyukban kell keresnünk.

Az asztrofizikusok hosszú éveket töltöttek el azzal, hogy kitalálják, miként oldhatja meg egy fekete lyuk ezt a feladatot. A választ 1969-ben találta meg a Royal Greenwich Observatory munkatársa, Donald Lynden-Bell. Feltételezése szerint a kvazár egy óriási fekete lyuk, amelyet egy forró gázból álló, mágneses tér által átjárt korong (ún. anyagbefogási korong) vesz körül (9.2. ábra).

A forró gázban majdnem mindig mágneses terek is vannak (2. fejezet). Ezek azonban „befagynak” a plazmába, a gáz és a mágneses erővonalak együtt mozognak³².

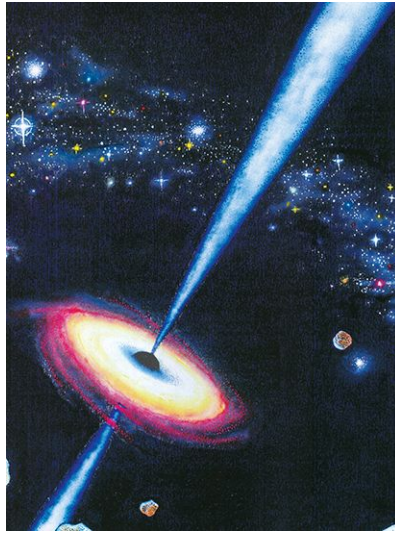
A mágneses tér a tömegbefogási korongon keresztül katalizátora a gravitációs energia hővé és fénné alakulásának. Nagyon erős fékező hatása (mágneses súrlódás)³³ lassítja a gáz körkörös mozgását, csökkentve ezzel a gravitációs erővel egyensúlyt tartó centrifugális erőt, ezért a gáz befelé, a fekete lyuk irányába spirálozik, közben azonban a lyuk gravitációja jobban gyorsítja a mozgását, mint ahogyan a mágneses súrlódás lassítja azt. Más szavakkal a gravitációs energia mozgási energiává alakul. A mágneses súrlódás ennek a mozgási energiának felét hő- és fényenergiává alakítja, és ez a folyamat ismétlődik.

Az energia tehát a fekete lyuk gravitációs teréből származik, a kinyeréséért pedig a mágneses súrlódás és a korong gázanyaga felelős.

³² Az asztrofizikában előforduló plazmáknak ez az alapvető tulajdonsága mágneses befagyásként ismert.

³³ A mágneses súrlódás egy összetett folyamat eredményeként jön létre, amelyben a mozgó gáz feltekeri és így felerősíti a mágneses teret, azaz a mozgási energiát a mágneses tér energiájává konvertálja. Ezután a mágneses térnek a fizikai tér szomszédos régióiban ellentétes irányú erővonalai a mágneses árkötődésnek nevezett folyamatban újrarendeződnek, ami a mágneses térben tárolt energiát hővé alakítja. Végeredményben tehát a gáz mozgási energiája a mágneses tér közvetítésével alakul hőenergiává.

Lynden-Bell következtetése szerint a kvazárok csillagászok által megfigyelt ragyogó fénye tehát nem más, mint a korong forró gázának sugárzása. A mágneses tér azonban nemcsak fékez,



9.2. ábra

Fantáziakép egy fekete lyuk körüli akkréciós korongról és a fekete lyuk pólusai közeléből kiinduló kilövellésekről

[Drawing by Matt Zimet based on a sketch by me; from my book Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy.]

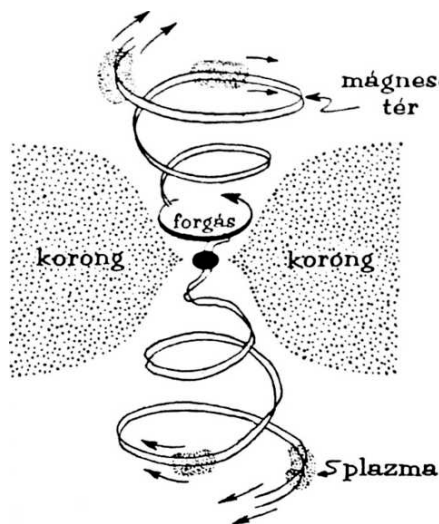
de gyorsít is, mégpedig a gáz szabad elektronjait és nagy sebességre. Az elektronok a mágneses erővonalak körül spirális mozgást végeznek, miközben a rádiótartományban energiát bocsátanak ki, ez a kvazár rádiósugárzása³⁴.

Lynden-Bell a newtoni fizika, a relativitáselmélet és a kvantumfizika törvényei alapján részletekbe menően kidolgozta a fenti folyamatokat. A kilövellések kivételével a kvazárok minden megfigyelt tulajdonságát könnyen meg tudta magyarázni. Okfejtését és számításait összefoglaló szakcikke (Lynden-Bell 1969) minden idők egyik legnagyszerűbb asztrofizikai publikációja.

³⁴ Ez az ún. szinkrotronsugárzás.

Kilövellések: Energia kinyerése az örvénylő térből

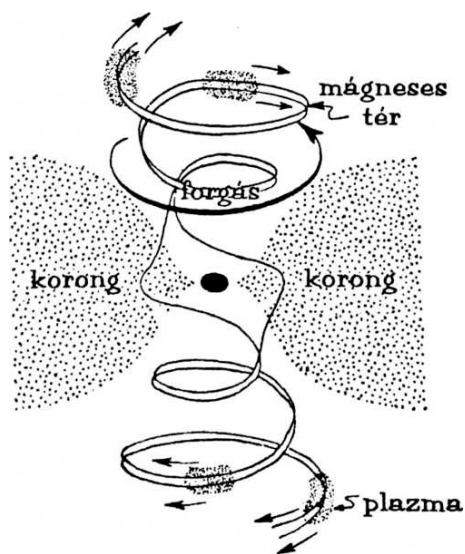
A következő években a csillagászok sok kvazárnál fedezték fel és tanulmányozták részletesen a kilövelléseket. Gyorsan kiderült, hogy a kvazárból, azaz a fekete lyuk és az akkréciós korong együtteséből kidobódó forró, mágnesezett gázaramokról van szó (9.2. ábra). A kilövellések



9.4. ábra

A kilövelléseket létrehozó Blandford-Znajek-mechanizmus

[Matt Zimet, vázlatomon alapuló rajza *Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* című könyvéből.]



9.4. ábra

Ugyanaz, mint a 9.3. ábra. csak a mágneses tér az akkréciós koronghoz kapcsolódik [Matt Zimet, vázlatomon alapuló rajza *Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* című könyvéből.]

hihetetlenül nagy energiájúak: a gáz közel fénysebességgel mozog bennük kifelé. Egy idő után beleütközik a környező, de a kvazártól távolabbi térrészek anyagába, a kölcsönhatás következtében pedig látható, rádió-, röntgen- és gamma sugárzást bocsát ki. A kilövellések néha olyan fényesek, mint maga a kvazár, intenzitásuk százszorososan haladja meg a legfényesebb galaxisokét.

Az asztrofizikusok közel egy évtizedig küzdöttek annak magyarázatával, hogy mi hajtja a kilövelléseket, miért olyan gyorsak, keskenyek és egyenesek. Több lehetséges válasz is született, közülük a legérdekesebb Roger Blandford (University of Cambridge) és tanítványa, Roman Znajek 1977-es, Roger Penrose oxfordi fizikus munkáján alapuló elképzelése (9.3. ábra).

Az anyagbefogási korongot alkotó gáz folyamatosan spirálozik a fekete lyukba. Amikor átlépi az eseményhorizontot, Blandford és Znajek szerint minden cseppnyi gáz a horizonton hagy egy kis mágneses teret, amelyet a környező korong ott is tart. A fekete lyuk forgása örvénylő mozgásba sodorja a teret (5.4. és 5.5. ábra), az pedig a mágneses mezőt tekeri fel (9.3. ábra). Az örvényes mágneses tér erős elektromos teret hoz létre, hasonlóan a vízerőművek generátoraihoz. Az elektromos és az örvényes mágneses tér együttese pedig felfelé és lefelé, közel fénysebességgel dobja ki a plazmát (forró, ionizált gázt), létrehozva és táplálva a két kilövellést. Hosszú évek átlagában irányukat a fekete lyuk forgása tartja állandó helyzetben a giroszkóphatásnak köszönhetően.

A 3C273 esetében csak az egyik kilövellés volt elég fényes a detektáláshoz (9.1. ábra), sok más kvazárnál azonban mindkettő látszik.

Blandford és Znajek részletesen kidolgozták az elméletet az Einstein-féle relativisztikus törvényekre alapozva. A kilövellések majdnem minden észlelhető tulajdonságát sikerült megmagyarázniuk.

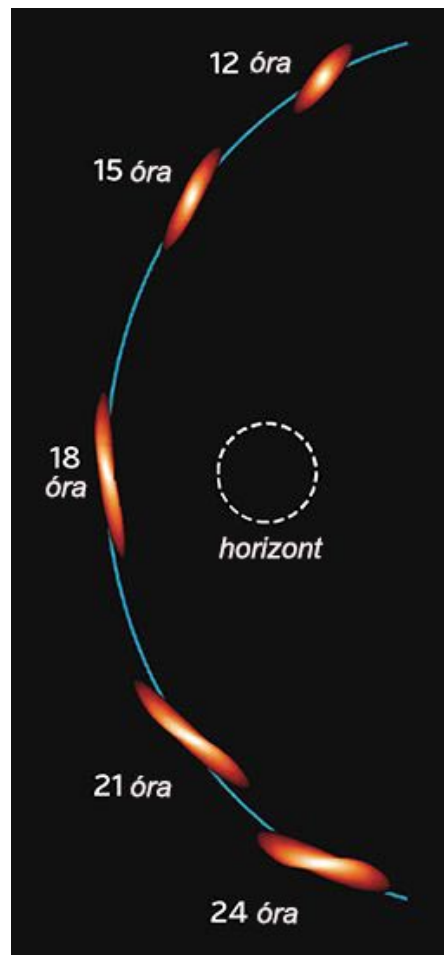
Az elmélet egy másik változatában (9.4. ábra) az örvényes mágneses tér nem a lyukhoz, hanem az akkréciós koronghoz kapcsolódik, és a korong pálya menti mozgása sodorja magával. Ettől eltekintve minden ugyanaz: dinamóhatás, és a plazma kirepül. Ez a módoszat akkor is működik, ha a tekete lyuk nem forog. Egészen biztosak vagyunk azonban abban, hogy a legtöbb fekete lyuk nagyon gyorsan forog. Így azt gondolom, hogy a kvazárok esetében a Blandford-Znajek-mechanizmus a leggyakoribb. Az 1980-as években rengeteg időt töltöttem a részleteinek elemzésével, sőt még egy kapcsolódó szakkönyv társszerzője is vagyok.

Honnan származik a korong? Árapályerők által szétszaggatott csillagok

Lynden-Bell 1969-ben úgy vélte, hogy a kvazárok a galaxisok centrumaiban helyezkednek el. Szerinte a gazdagalaxist azért nem látjuk, mert sokkal halványabb, mint a kvazár, amelynek sugárzása egyszerűen elnyomja a galaxisét. Az azóta eltelt évtizedek technikai fejlődésének köszönhetően a csillagászoknak már sikerült detektálni a kvazárokat körülvevő galaxisok fényét is, igazolva ezzel Lynden-Bell sejtését.

Azokban az évtizedekben azt is megfejtettük, hogy honnan származik a tömegbefogási korongokat alkotó gáz túlnyomó része. Alkalmanként egy csillag olyan közel kerülhet a fekete lyukhoz, hogy annak árapályereje (4. fejezet) szétszaggatja. A keletkező gázcsomók nagy részét a fekete lyuk befogja, ebből jön létre az akkréciós korong, a gáz kisebb része pedig megszökik.

Az elmúlt években nagy teljesítményű számítógépekkel az asztrofizikusok már szimulálni is tudják a folyamatot. A 9.5. ábra James Guillochon, Enrico Ramirez-Ruiz és Daniel Kasen (University of California at Santa Cruz), illetve Stephan Rosswog



9.5. ábra

Egy vörös óriáscsillag szétszakadása egy Gargantuához hasonló fekete lyuk árapályereinek hatására

(University Bremen) legújabb szimulációjának eredményét mutatja ³⁵. Az ábrán nem látható kezdő időpontban a csillag majdnem pontosan a fekete lyuk felé mozgott, amelynek árapályereje elkezdte a lyuk irányában nyújtani, arra merőlegesen pedig összenyomni a csillagot (lásd 6.1. ábra). Tizenkét órával később már az erősen deformált csillag pozíciója is látszik az ábrán. A következő néhány órában a kék színű lendítópályán mozog a lyuk körül, miközben alakja tovább torzul. Huszonnégy óra elteltével a csillagot saját gravitációs tere már nem tudja összetartani, így szétszakad.

A csillag későbbi sorsát James Guillochon és Suvi Gezari (Johns Hopkins University) egy másik szimulációjából származó 9.6. ábra mutatja.

A teljes szimuláció ezen a címen érhető el:

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2012/18/video/a/>

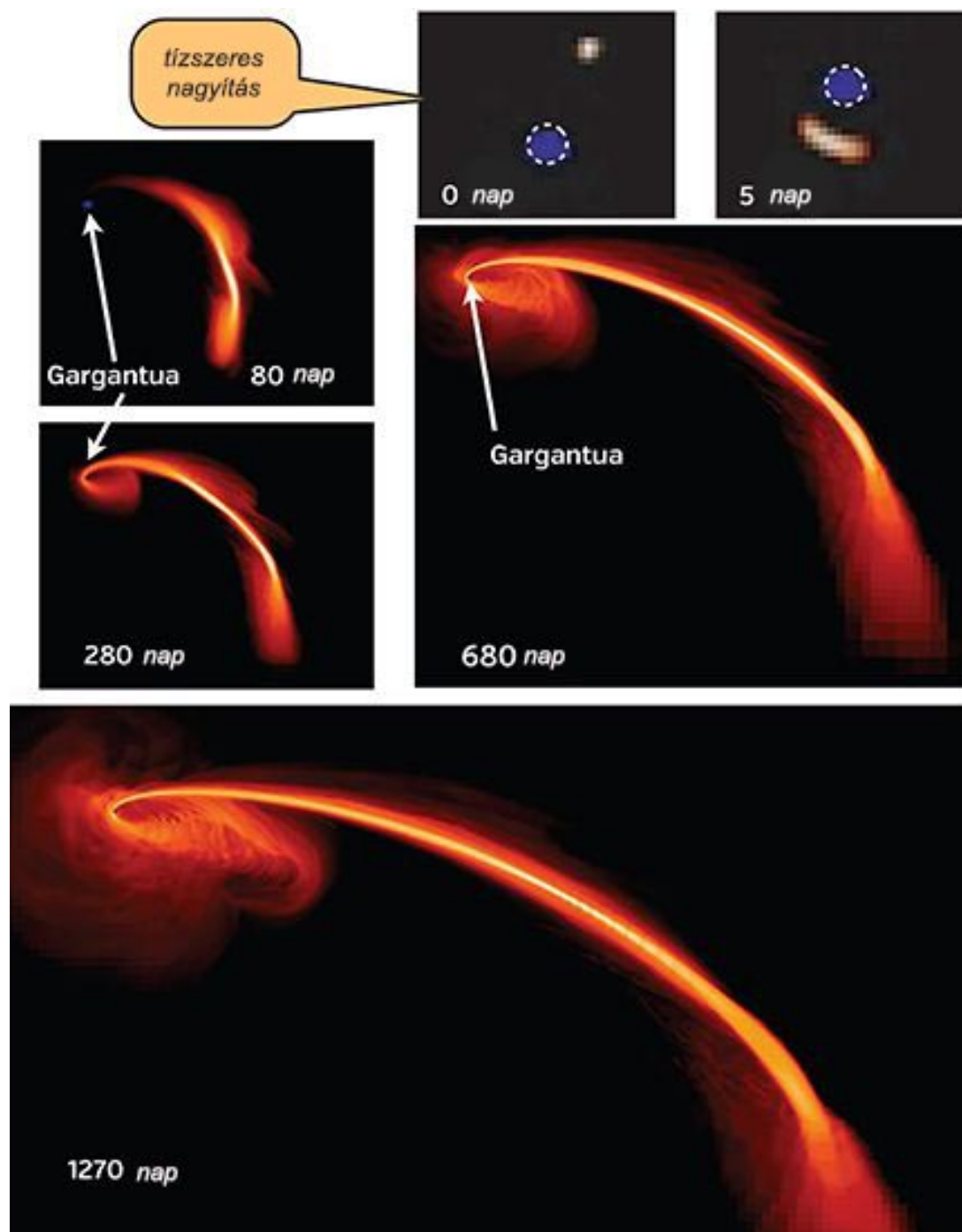
A két felső kép röviddel a 9.5. ábra történésének kezdete előtti, illetve vége utáni helyzetet ábrázolja. Ezeket a többihez képest tízszeres méretűre nagyítottam, hogy a lyuk és a szétszakadó csillag is látható legyen.

Amint a teljes képsorozat mutatja, a következő néhány évben a csillag anyagának legnagyobb része a fekete lyuk körüli pályára áll, ahol elkezdli létrehozni a tömegbefogási korongot. A maradék anyag pedig gázsugar formájában megszökik a lyuk gravitációs vonzásából.

A Gargantua akkréciós korongja és a hiányzó kilövellés

Egy tipikus akkréciós korong és kilövellései olyan intenzív röntgen-, gamma-, rádió- és optikai sugárzást bocsátanak ki, hogy a közelben tartózkodó embereket egyszerűen megsütnék. Ezt elkerülendő, Christopher Nolan és Paul Franklin egy „vérszegény” anyagbefogási korongot engedélyeztek csak a Gargantuának.

³⁵ A fekete lyuk átmérőjét a Gargantua méretére változtattam, a csillagét pedig egy vörös óriáséra, és az időadatokat is ennek megfelelően módosítottam a 9.5. ábrán.



9.6. ábra

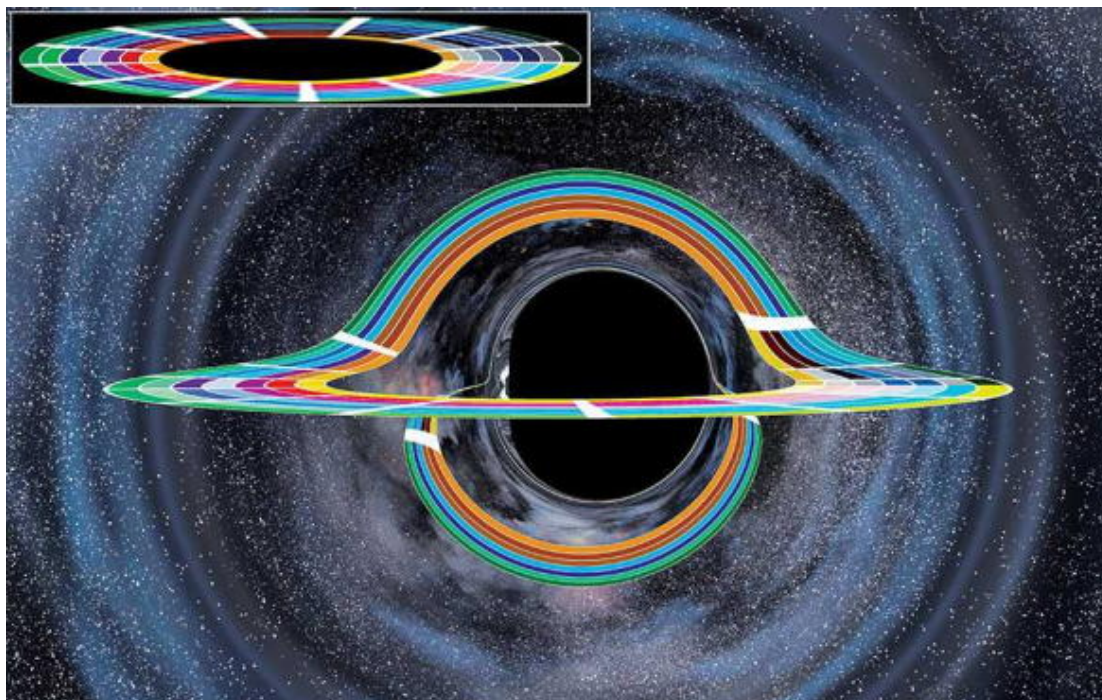
A 9.5. ábra csillagának további sorsa

Ez a „vérszegénység” természetesen semmilyen kapcsolatban nincs a humán megfelelőjével. Azt próbálja érzékeltetni, hogy a kvazárok esetében megszokott több száz millió fokos diszkekkel ellentétben a Gargantua akkréciós korongjának hőmérséklete csak hány ezer fok, ami a Nap felszíni hőmérsékletéhez hasonló, így látható fényt bocsát ki, de kevés röntgen- és gamma-sugárzást. Mivel a gáz viszonylag hideg, az atomok termikus mozgásának

sebessége nem elég nagy ahhoz, hogy emiatt a korong jelentősen felfúvódjon. Azaz vékony marad, a Gargantua egyenlítői síkja körül koncentrálódik, és csak kissé puffadt.

Az ilyen tulajdonságú korongok gyakoriak lehetnek azon fekete lyukak körül, amelyek az elmúlt néhány millió évben nem nyeltek el szétszakított csillagokat - azaz régóta „éheznek”. A korábban a korongban keringő plazmába fagyott mágneses tér már legyengült, az általa hajtott kilövellések pedig leálltak. Ilyen a Gargantua korongja: vékony, kilövellés nélküli és az ember számára viszonylag biztonságos. Viszonylag.

A Gargantua tömegbefogási korongja egészen másként néz ki, mint azok a vékony



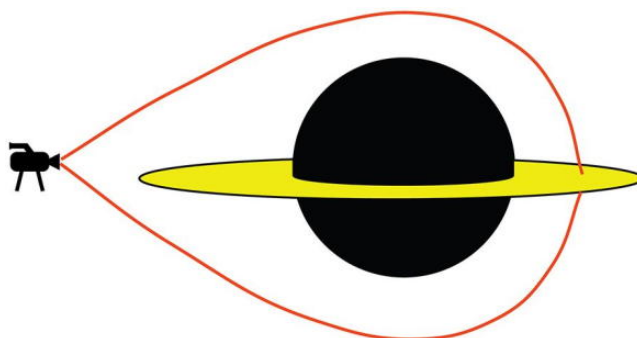
9.7. ábra

A Gargantua egyenlítői síkjában elhelyezkedő, infinitezimálisan vékony korongnak a görbült tér gravitációs lencse-hatása által előállított képe. Ebben az esetben a fekete lyuk nagyon gyorsan forog. Kis kép: A korong képe a fekete lyuk hiányában. [From Eugénie von Tunzelmann's artistic team at Double Negative.]

diszkek, amelyeket az interneten vagy asztrofizikai szakcikkekben láthatunk, mivel utóbbiak teljes mértékben figyelmen kívül hagynak egy kulcsfontosságú tulajdonságot: a korong fekete lyuk általi gravitációs lencsézését. Nem így a *Csillagok között*-ben, ahol Chris ragaszkodott a vizuális hitelességhez.

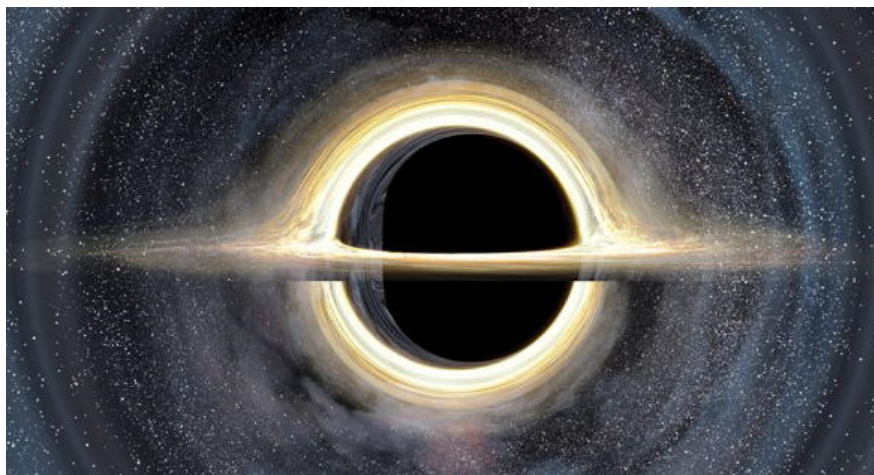
9.8. ábra

A tömegbefogási korong Gargantua mögötti részének képeit a vörös színnel jelzett fénysugarak állítják elő a kamerában, egyet a fekete lyuk árnyéka felett, egyet pedig alatta.



Eugénie von Tunzelmann feladata volt, hogy Oliver James 8. fejezetben leírt gravitációs lencse-kódjába egy akkréciós korongot is beépítsen. Első lépésként, csak hogy lássa, mit is csinál a lencsézés egyáltalán, Eugénie egy végtelenül vékony, pontosan a Gargantua egyenlítői síkjában elhelyezkedő koronggal dolgozott. A könyv számára ennek a diszknek egy szemléletes, egyenletes szélességű sávokból álló változatát is létrehozta (9.7. ábra).

Ha nem lenne gravitációs lencsézés, a korong úgy nézne ki, ahogyan a kis képen látható. A lencsézés azonban ehhez képest hatalmas változásokat okoz (a 9.7. ábra nagy képe). Azt várhatnánk, hogy a korong fekete lyuk mögötti része nem fog látszani. De nem így van. A gravitációs lencsézés miatt két képe is keletkezik, egy a Gargantua felett, egy pedig alatta (lásd 9.8. ábra).



9.9. ábra

A Gargantua végtelenül vékony, színessávos diszkje (9.7. ábra) egy sokkal realisztikusabb, de még mindig infinitezimálisan vékony anyagbefogási koronggal helyettesítve. [From Eugénie von Tunzelmann's artistic team at Double Negative.]

A korong Gargantua mögötti felső része által kibocsátott sugárzás a lyuk felett jut el a kamerába, létrehozva a korong képének Gargantua árnyéka feletti szeletét (9.7. ábra), és ugyanez történik az alsó rész sugárzásával is, csak alul, a Gargantua árnyéka alatt.

Az elsőrendű képeken belül a korong vékony másodrendű képeit is láthatjuk, szintén az árnyék alatt és felett, de a széléhez közelebb. Ha pedig a kép sokkal nagyobb méretű és

felbontású lenne, akkor láthatnánk a harmad- és még magasabb rendű képeket is. az árnyék-hoz egyre közelebb és közelebb.

Meg tudjuk-e magyarázni, hogy miért olyan a lencsézett korong, amilyennek látjuk? Az árnyék alatt ívelő elsőrendű kép miért csatlakozik az árnyék feletti vékony, másodrendű képhez? Az alsó és felső képívek színes sávjai miért szélesednek ki, oldalt pedig miért nyomódnak össze annyira?



9.10. ábra

A Gargantua és akkréciós korongja, bal szélé felett Miller bolygójával. A korong olyan fényes, hogy a háttérben a csillagok és a ködök szinte nem is látszanak. [A Csillagok között-ből a Warner Bros. Entertainment Inc. engedélyével]

A Gargantua körüli térörvény (a tér a bal oldalon felénk mozog, a jobb oldalon távolodik tőlünk) eltorzíttja a korong képét. A bal oldalon az árnyéktól távolítja a korongot, a jobb oldalon pedig közelíti ahhoz, így a diszk kissé aszimmetrikusnak látszik. (Meg tudjuk magyarázni, miért?)

Tovább lépve Eugénie von Tunzelmann és csapata a színes-sávós korongváltozatot (9.7. ábra) egy sokkal realisztikusabb vékony korongra cserélte (9.9. ábra). Ez sokkal szebb volt, de okozott egy problémát. Chris nem akarta összezavarni a nézőket a korong és a fekete lyuk aszimmetriájával, az árnyék lapos bal szélével és a csillagmező 8. fejezetben tárgyalt, szélhez közeli komplikált képével. Paul ezért lelassította a Gargantua forgását a maximális sebesség 0,6 tizedére, aminek következtében ezek a furcsaságok sokkal kevésbé feltűnőek. (A korong bal oldalának felénk tartó és a jobb oldalának tőlünk távolodó mozgása miatti Doppler-eltolódás hatását Eugénie már eleve kihagyta.

Ez a diszket még inkább aszimmetrikussá tette volna: a bal oldalon a fényes kék, a jobb oldalon pedig a sötét vörös szín dominanciája még jobban megzavarhatta volna a nézőket!)



9.11. ábra

A Gargantua akkréciós korongjának részlete közelről, miközben az Endurance áthalad felette. A fekete terület a Gargantua, körülötte a korong, az előtérben pedig némi szórt fehér fény. [A Csillagok között-ből a Warner Bros. Entertainment Inc. engedélyével]

A Double Negative művészeti részlege ezután egy valódi, nem túl nagy tömegű anyagbefogási korongtól várható textúrát és felszíni egyenetlenségeket adott a diszkhez, a kicsi puffadást a pontról pontra való változással megoldva. A Gargantuához közelebb a korong forróbb (fényesebb), attól távolodva pedig hidegebb (halványabb) lett. Nagy távolságban kissé vastagították is, mivel a Gargantuának a korongot az egyenlítői síkba lapító árapályereje a fekete lyuktól távolabb sokkal gyengébb. Egy háttérgalaxist is adtak a képhez, porral, ködökkel, csillagokkal. A végén pedig rátették a korongnak a kamera lencserendszerében szóródó erős fénye által okozott lencsecsillogást. Munkájuk gyönyörű, lenyűgöző képkockákat eredményezett (9.10. és 9.11. ábra).

Eugénie és csapata természetesen a gáz Gargantua körüli keringéséről is gondoskodott, különben az belezuhant volna a lyukba. A gravitációs lencsézéssel kombinálva a gáz keringése a 9.11. ábrán látható lenyűgöző áramlási hatásokat hozott létre.

Mekkora öröm volt először meglátni ezeket a képeket! Hollywoodi filmben első ízben szerepelt egy fekete lyuk és akkréciós korongja olyan formában, ahogyan mi, emberek láthatjuk

majd, ha elérjük a csillagokat. Asztrofizikusként elsőként láthattam egy realisztikus, gravitációsan lencsézett tömegbefogási korongot, amelynek képe a lyuk felett és alatt is megjelenik, ahelyett hogy eltűnne a fekete lyuk árnyéka mögött.

A vékony, ám mégis gyönyörű, kilövellések nélküli akkréciós korongjával a Gargantua környezete vajon barátságos? Amelia Brand így gondolja...

10. A véletlen az evolúció fő építőköve

A *Csillagok között*-ben, miután Miller bolygóját sterilnek találták, Amelia Brand amellet érvel, hogy Edmunds Gargantuától nagyon távol található bolygójára menjenek és ne Mann közeli planétájára: „A véletlen az evolúció fő építőköve — mondja Coopernek. - De egy fekete lyuk körül keringve nem sok minden történik. Az beszívja az aszteroidákat, üstökösöket, kiküszöböli az események zömét³⁶. Ezért jobb a másik bolygó.”

Azon kevés esetek egyike ez a *Csillagok között*-ben, ahol a szereplők állítása tudományos szempontból nem állja meg a helyét. Christopher Nolan tisztában volt vele, hogy Brand érvelése hibás, mégis úgy döntött, hogy ezt a sort megtartja Jonah forgatókönyvéből, mondván, a tudósok sem tévedhetetlenek.

Bár a Gargantua is igyekszik elnyelni az aszteroidákat és üstökösöket, ahogyan a bolygókat, csillagokat és a kisebb fekete lyukakat is, ilyen esemény csak nagy ritkán következik be. Miért?

A Gargantuától távol minden objektumnak nagy az impulzusnyomatéka³⁷, hacsak a pályája nem egyenesen a fekete lyuk irányába mutat. A nagy impulzusnyomaték nagy centrifugális erőt is jelent, ami könnyedén ellensúlyozhatja a Gargantua gravitációs vonzását, még akkor is, ha az objektum pályája a fekete lyuk közelében halad.

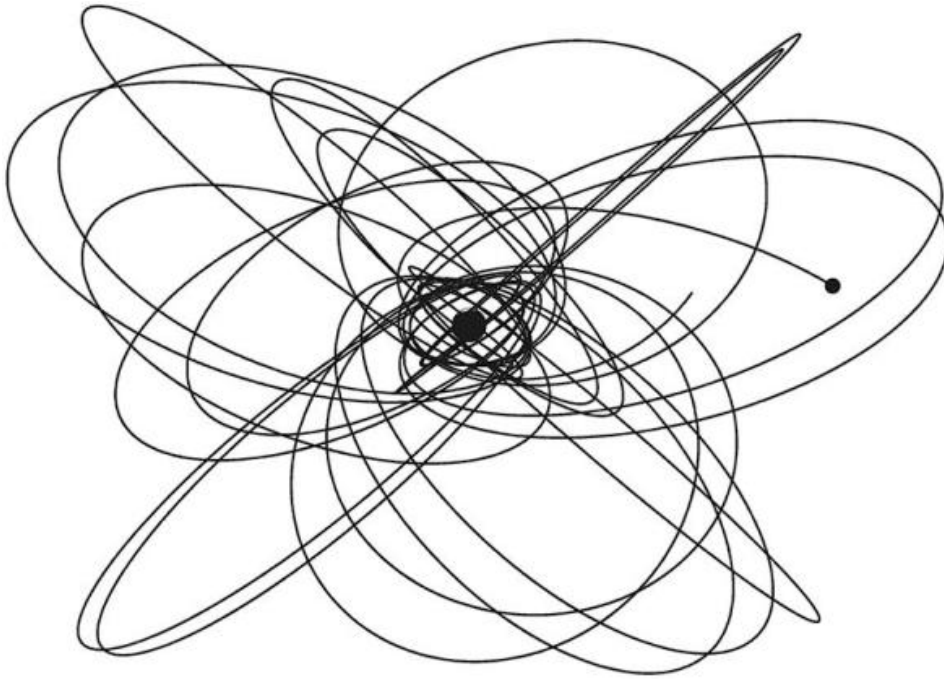
Ilyen pályát mutat a 10.1. ábra. Az objektum a Gargantua gravitációs vonzásának hatására a lyuk felé halad. Mielőtt azonban elérné az eseményhorizontot, a centrifugális erő elég nagygyá válik ahhoz, hogy kirepítse onnan. Ez ismétlődik, szinte a végtelenségig.

Ezt csak egyvalami zavarhatja meg, mégpedig egy harmadik, nagy tömegű test (kis fekete lyuk, csillag vagy bolygó) szoros megközelítése. Ennek gravitációs hatása egy másik, Gargantua körüli pályára lendítheti (7. fejezet) az objektumot, ami az impulzusnyomaték megváltozását is jelenti. Az esetek többségében az új impulzusnyomaték nem sokban különbözik a régitől, azaz a nagy impulzusnyomatéknak megfelelő nagy centrifugális erő ugyanúgy megvédi az objektumot a Gargantuától, mint korábban.

³⁶ Mármost az üstökösökkel és kisbolygókkal történő véletlen ütközéseket. A filmben a köztes mondatokból egyértelmű, hogy Brand mire gondol.

³⁷ Az impulzusnyomaték nagysága az objektum körsebességének és a Gargantuától mért távolságának a szorzata. (Tömegegységre vonatkoztatva) Az impulzusnyomaték fontos fizikai mennyiség, mivel érteke a pálya mentén állandó, még bonyolult trajektóriák esetében is.

Nagyon ritkán azonban előfordulhat, hogy az új pálya majdnem pontosan a Gargantua felé



10.1. ábra

Egy tipikus pálya a Gargantuához hasonló, gyorsan forgó fekete lyukak körül. [Steve Drasco szimulációjából]

mutat, azaz elegendően kicsiny impulzusnyomatékú ahhoz, hogy immár ne a centrifugális erő győzzön, és az objektum átlépje a Gargantua horizontját.

Az asztrofizikusok több millió csillag pályáját szimulálták már a Gargantuához hasonló gigantikus fekete lyukak körül. A gravitációs lendítések folyamatosan változtatják a pályákat, ennek következtében pedig a csillagsűrűséget (a csillagok térfogategységenkénti számát), amely a Gargantua körül nem csökken, hanem nő. Ugyanígy a kisbolygók, üstökösök sűrűsége és véletlenszerű becsapódásaik gyakorisága is. A Gargantua körüli tér egyre veszélyesebbé válik az egyedekből álló létformák, köztük az ember számára, így biztosítva gyorsabb fejlődési lehetőséget az elegendő egyedszámban túlélő fajoknak.

A Gargantua körüli veszélyes környezet feltérképezése után tegyünk egy rövid kitérőt. Térjünk vissza a Naprendszerbe, a Földre és vizsgáljuk meg, hogy a földi katasztrófák elől elmenekülhetünk-e csillagközi utazással.

III.KATASZTRÓFA A FÖLDÖN

11. Növényvész



Amikor 2007-ben Jonathan (Jonah) Nolan forgatókönyvíróként csatlakozott a Csillagok között stábjához, a film cselekményét egy olyan korba helyezte, amikor az emberi civilizáció már csak halvány árnyéka a mainak, a növényi betegségek³⁸ pedig éppen az utolsó csapást mérik rá. Később a rendezői székbe ülve Jonah bátyja, Christopher Nolan is magáévá tette ezt az elképzelést.

Lynda Obst, Jonah és én azonban aggódtunk kissé Cooper Jonah által elképzelt világának tudományos megalapozottsága miatt: Hogyan lehet az emberi civilizáció hanyatlása ilyen mértékű, miközben sok tekintetben egyébként teljesen rendben lévőnek tűnik? Tudományos szempontból lehetséges-e, hogy a kártevők minden terményt elpusztítsanak?

Mivel nem sokat tudok a növényvészről, szakértőkhöz fordultunk tanácsért. 2008. június 8-án egy vacsorát szerveztem a Caltech Athenaeum klubjában. Az étel nagyon finom volt, a bor pedig kitűnő. A résztvevők Jonah, Lynda, én és a szükséges szaktudás megfelelő keverékét képviselő négy biológus a Caltechről: Elliot Meyerowitz, a növények, Jared Leadbetter, a növényeket fertőző különböző mikrobák, Mel Simon, a mikrobák növényi sejtekre gyakorolt hatásának szakértője és a Nobel-díjas David Baltimore, akinek széles áttekintése van a biológia minden területéről. (A Caltech csodálatos hely. A londoni Times az elmúlt három év mindegyikében a világ legjobb egyetemei közé sorolta, ennek ellenére elég kicsi - mindössze 300 professzor, 1000 egyetemi és 1200 posztgraduális hallgató, hogy a tudomány minden területéről ismerjem a calteches szakértőket. Könnyű volt tehát megtalálnom és összehívnom őket a „vészvacsoránkra”.)

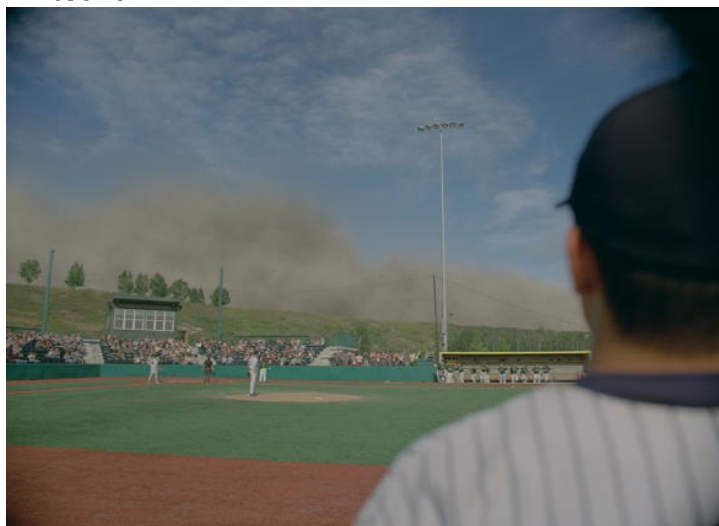
A vacsora kezdetekor egy mikrofont helyeztem a kerek asztal közepére, és rögzítettem a két és fél órás kötetlen beszélgetést. A fejezet ezen a felvételen alapul, de természetesen megszerkesztettem az elhangzottakat. A végeredményt a résztvevők ellenőrizték és jóváhagyták.

Viszonylag könnyen arra a végkövetkeztetésre jutottunk, hogy Cooper világa tudományos szempontból lehetséges, de kevésbé valószínű. Nincs rá sok esély, hogy bekövetkezzen, de nem lehetetlen. Ezért jelöltem ezt a fejezetet az  szimbólummal spekulációnak.

³⁸ Az eredetiben blight. Az angol kifejezés olyan növényi betegségek összefoglaló neve, amelyeket általában gombák, tágabb értelemben ún. patogének okoznak. Az eredeti szóval összemérhető rövidségű, a lényegét lefedő magyar fordítása ismereteink szerint nincs, a növényvédelmi szakirodalomban különböző összetételekben más-más módon fordítják, például a fire blight a tűzelhalás, a bacterial blight pedig a baktériumos sárgulás. A filmben a néhány előfordulásakor a penész kifejezést használták, bár valószínűleg nem ez a legjobb választás. Mi az általánosabb növényvész kifejezéssel helyettesítjük.

Cooper világa

A bor és az előétel elfogyasztása közben Jonah vázolta elképzelését Cooper világáról (11.1. ábra): Katasztrófák egymásutánja Észak-Amerika lakosságát a tizedére vagy még jobban csökkentette, de hasonló történt a többi kontinensen is. A társadalom jórészt a mezőgazdaságon alapul, az élet pedig folyamatos küzdelem az élelem és a lakhatás biztosításáért. De azért nem antiutópia. Az élet elviselhető, bizonyos tekintetben pedig még kellemes is, többek között olyan apró örömekkel, mint a baseball. Lelkesítő célok azonban már nincsenek.



11.1. ábra

Életképek Cooper világából. Fent : Baseball-meccs a háttérben egy porviharral Lent: Cooper háza és teherautója a vihar után. . [A Csillagok között-ből a Warner Bros. Entertainment Inc. engedélyével]



Nem törekszünk nagy dolgok megvalósítására. Megelégszünk sokkal kevesebbel, egyszerűen csak élni szeretnénk.

Legtöbbször úgy gondoljuk, hogy a katasztrófák véget értek, helyzetünk stabilizálódott az új világban, és hamarosan megindulhat a fejlődés. A valóságban azonban a fertőzés halálos, és olyan gyorsan terjed növényről növényre, hogy az emberi faj sorsa Cooper unokáinak korára végleg megpecsételődik.

Lehetséges katasztrófák

Milyen katasztrófák vezethettek Cooper világához? Biológus szakértőink több lehetséges, bár valószínűtlen választ adtak a kérdésre. Íme néhány:

Leadbetter: Ma (2008) az emberek túlnyomó része nem saját maga termeli meg az általa elfogyasztott élelmet. Az élelmiszer előállításának és elosztásának globális rendszerétől függünk, és ez igaz a vízhez való hozzáférésre is. Képzeljük el, hogy ez a rendszer valamilyen biológiai vagy geológiai katasztrófa következtében összeomlik. Kis léptékben: ha például néhány egymás utáni évben nem esne hó a Sierra Nevada hegységben, Los Angeles előbb-utóbb ivóvíz nélkül maradna. Tízmillió ember kényszerülne otthona elhagyására, Kalifornia mezőgazdasági termelése pedig meredeken zuhanna. De könnyen elképzelhetünk sokkal nagyobb léptékű katasztrófákat is. Cooper erősen megfoglyatkozott népességű, mezőgazdaságon alapuló világában persze a termelési és elosztási problémák is kisebbek.

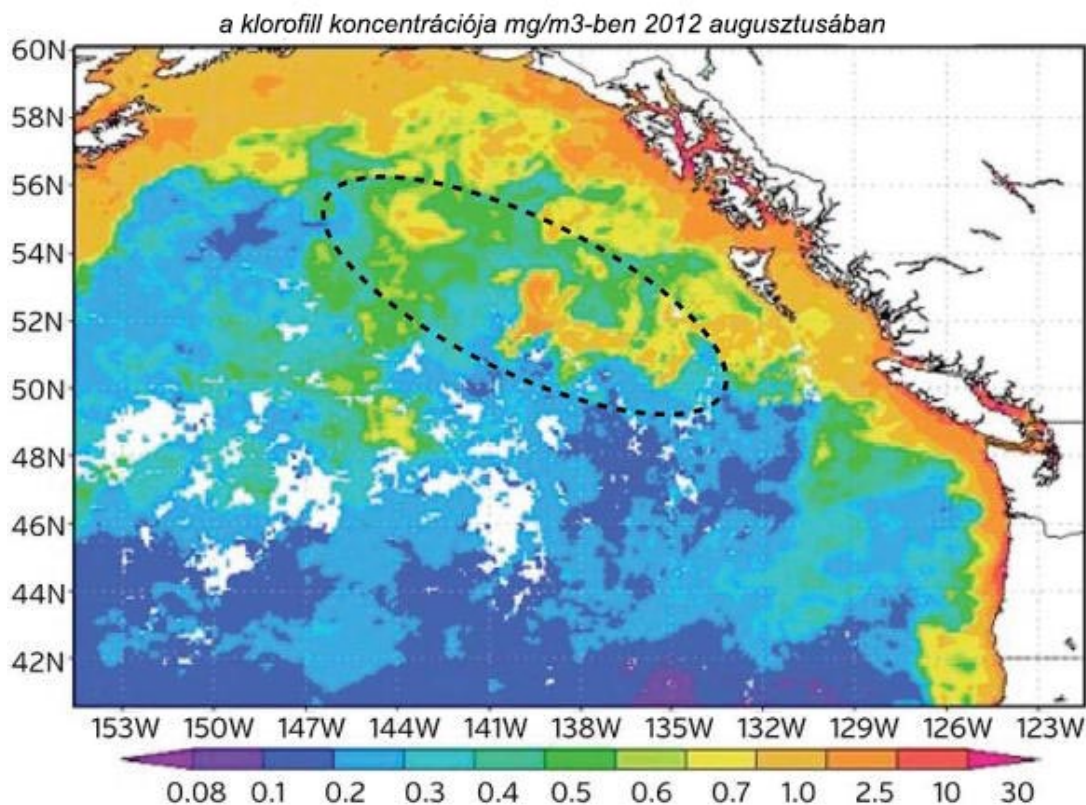
Simon: Egy másik lehetséges katasztrófa: A történelem során folyamatos küzdelem zajlott az emberiség és a *patogének* - az emberi, növényi és állati szervezeteket támadó mikrobák - között. Az emberi faj kifinomult immunrendszert fejlesztett ki a bennünket közvetlenül veszélyeztető patogének ellen. Ezek azonban folyamatosan változnak, és mi egy fél lépéssel mindig mögöttük járunk. Eljőhet az a pont, amikor a patogének már olyan gyorsan változnak, hogy az immunrendszerünk nem tud lépést tartani az ütemmel.

Baltimore: Például az AIDS vírusa nagyon gyorsan mutálódhat egy sokkal ragályosabb formába, amely a szexuális úton történő átadás helyett már cseppfertőzéssel vagy belégzéssel is terjedhet.

Simon: A Föld globális felmelegedés miatt felolvadó jégsapkái alól kiszabadulhatnak az utolsó jégkorszak előtti, azóta szunnyadó halálos patogének.

Leadbetter: Egy másik forgatókönyv: Az emberek rádöbbennek a globális felmelegedés veszélyeire, amit főként a légkörbe juttatott növekvő mennyiségű szén-dioxid okoz.

Védekezésként serkentik a Föld óceánjaiban az algák szaporodását, amelyek fotoszintézisük révén megkötnék a légköri szén-dioxid jelentős részét. Az óceánokba jutó nagy mennyiségű vas alkalmas is lenne erre. A folyamatnak azonban lehetnének nem várt mellékhatásai.



11.2. ábra

A klorofill koncentrációjának [algák eloszlásának] térképe, miután 100 tonna vas-szulfátot szórtak az óceánba Brit Columbia partjainál. A vas által serkentett növekedés nagy algakonzentrációt okozott a szaggatott vonallal rajzolt ellipszisen belül
[Giovanni/Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center/ NASA]

Megjelenhetnének például olyan új algafajok, amelyek *toxinokat* termelnének és az óceánokat megmérgeznék. A tengeri élővilágot (halak és növények) tömeges kihalás sújtaná. Mivel az emberi civilizáció nagymértékben függ az óceánoktól, ez ránk nézve is katasztrofális következményekkel járna. Vajon lehetséges ez? Egyáltalán nem. Kísérletekben a tengerbe helyileg szórt vas hatására létrejött algapopulációban - amely akkora volt, hogy zöld foltja még az űrből is látszott - megjelentek ugyan addig ismeretlen algafajok, de szerencsénkre ezek nem voltak ártalmasak, bár persze lehettek volna.

Meyerowitz: A légköri ózonlyukon áthatoló ultraibolya sugárzás hatalmas algavirágzást idézhet elő, így új patogéneket hozhat létre. Ezek kipusztíthatnák a tengeri növényzetet, majd a szárazföldre kijutva a termés is elpusztulhatna miattuk.

Baltimore: Ilyen katasztrófákkal szembesülve csak a tudományban és a technológiában bízhatunk. Ha nem fektetünk ezek fejlesztésébe, vagy gúzsba kötjük azokat olyan zavaros ideológiákkal, mint például az evolúció tagadása, pedig a katasztrófák legfőbb okozója éppen az evolúció, könnyen olyan helyzetben találhatjuk magunkat, hogy nem áll rendelkezésünkre a szükséges megoldás.

És végül - a vázolt forgatókönyvek többségének következményeként - nyakunkon a *növényvész*.

Növényvész

A *növényvész* tehát azon növényi betegségek összefoglaló neve, amelyeket patogének okoznak.

Baltimore: Ha az emberiséget szeretnénk eltörölni a Föld felszínéről, a legjobb módja ennek a növények megfertőzése, hiszen ha nincs termés, akkor nincs élelem sem. Igaz, ehethetnénk állatokat is, de azok is növényekkel táplálkoznak.

Meyerowitz: Elegendő lenne, ha a növényvész csak a fűféléket pusztítaná el. Ezek ugyanis a legtöbb mezőgazdasági kultúránknak - rizs, kukorica, árpa, cirok, búza - az alapjai. És az általunk fogyasztott húst adó állatok nagy része is fűféléket legel.

Meyerowitz: A megtermelt élelmiszereink 50 százalékát már ma is elpusztítják a patogének a betakarítás előtt, és Afrikában ennél is nagyobb az arány. Gombák, baktériumok, vírusok... mind lehetnek patogének. A keleti partot valaha gesztenyefák borították. Ma már hírmondójuk sincs. Növényvész pusztította el őket. Szintén ez volt az oka a 18. században kedvelt banánfélék eltűnésének is. De a helyüket elfoglaló Cavendish-banánra is ugyanez a sors várhat.

Kip: Én azt hittem, hogy ezek a fertőzések csak a növények egy szűk csoportját támadják, és nem terjednek át másokra.

Leadbetter: Vannak általános fertőzések is. Úgy tűnik, bizonyos egyensúly van az általános, sok fajt megtámadó és a speciális, csak kevés fajra ható fertőzések között. Utóbbiak esetében a megsemmisülési arány nagyon magas is lehet: kiütésszerűen elpusztíthatják egy adott növénycsoport egyedeinek akár 99 százalékát is. Előbbieknél a veszélyeztetett növények köre sokkal szélesebb, egy kiválasztott egyed azonban jóval kisebb valószínűséggel fertőződik. A természetben ezt láthatjuk újra meg újra.

Lynda: Elképzelhető, hogy egy általános fertőzés egyszer csak sokkal pusztítóbbá válik?

Meyerowitz: Igen, volt már rá példa. A földtörténeti őskorban, amikor a cianobaktériumok elkezdtek oxigént termelni, aminek következtében a Föld légkörének összetétele radikálisan megváltozott, majdnem minden más életforma kipusztult.

Leadbetter: Az oxigén azonban csupán halálos melléktermék, a cianobaktériumok által termelt mérge volt, nem pedig általános patogén.

Baltimore: Bár ilyet még nem tapasztaltunk, de én el tudom képzelni, hogy egy rendkívül veszélyes speciális patogén pusztító globális patogénné válik. Rovarak segítségével terjedhet egyik fajról a másikra. A *popillia japonica* például, amely mintegy kétszáz különböző növényfajjal táplálkozik, könnyen sok fajt megfertőzhet az általa terjesztett patogénnel, ezek pedig alkalmazkodhatnak a megtámadott fajhoz, annak vesztét okozva.

Meyerowitz: Szerintem a teljesen halálos globális patogén a kloroplasztokat támadná. Ezek alapvető szerepet játszanak a fotoszintézisben, abban a folyamatban, amelynek során a növények a levegőből felvett szén-dioxidból és a gyökereiken keresztül felszívott vízből napfény segítségével a növekedésükhöz szükséges szénhidrátokat gyártanak. Kloroplasztok nélkül a növény elpusztul. Képzeljünk el most egy olyan, mondjuk az óceánokban kifejlődött új patogént, amelyik a kloroplasztokat támadja meg. Elpusztítaná az összes algát és növényi életet az óceánokban, onnan kijutva pedig a szárazföldi növényeket is. Minden sivataggá válna. És lehetséges is, nem látok semmilyen okot, ami megakadályozhatná. Kicsi a valószínűsége, hogy valaha is bekövetkezzon, de lehet Cooper világának okozója.

Ezek a forgatókönyvek olyan lidércnyomásszerű érzéssel tölthetnek el bennünket, amely képes éjszaka is ébren tartani egy biológust. A *Csillagok között*-ben a Földön rendkívül gyors ütemben végigsöprő globális pusztító fertőzés főszerepet játszik. Brand professzornak van azonban egy másik aggodalma is: elfogyhat az oxigén, amit belélegzünk.

12. Légszomj



A *Csillagok között* elején Brand professzor azt mondja Coopernek: „A földi levegő 80 százaléka nitrogén, amit mi nem is hasznosítunk. A növényi kórokozók viszont igen, és ahogy terjednek, egyre kevesebb oxigén jut a levegőbe. Az utolsó éhező emberek lesznek az első fulladozók. És a lánya nemzedéke... Ők lesznek a Föld utolsó lakói.”

Van bármilyen tudományos alapja a professzor jóslatának?

A választ két tudományterület, a biológia és a geofizika határán kell keresnünk. Ezért vacsoránk egyik résztvevőjét, Elliot Meyerowitz biológust és két geofizikust, a Caltech professzorát, Gerald Wasserburgot, aki a Naprendszer, a Föld és a Hold keletkezésének és fejlődésének szakértője, illetve Yuk Yungot, a földi légkör és a bolygóatmoszférák fizikájának és kémiájának jó ismerőjét kérdeztem. Tőlük és az általuk ajánlott szakirodalomból a következőket tudtam meg.

A belélegezhető oxigén keletkezése és megsemmisülése

Az általunk belélegzett oxigén két atomból álló, elektronok által összetartott molekula, az O_2 . A Földön még sok egyéb formában is létezik oxigén: például a szén-dioxidban, a vízben, a földkéreg ásványaiban, hogy csak néhányat említsünk. A szervezetünk azonban ezt az oxigént csak akkor tudja hasznosítani, ha valamilyen organizmus felszabadítja, és O_2 molekulává alakítja.

A légköri O_2 molekulákat a légzés, az égés és a bomlási folyamatok fogyasztják. Az általunk belélegzett O_2 a szervezetünkben szénnel egyesül, aminek eredményeként szén-dioxid (CO_2) keletkezik, és rengeteg energia szabadul fel, amelyet a szervezetünk hasznosít. A fa égésekor a lángokban a fa szénatomjai gyorsan egyesülnek a légköri oxigénnel és szintén CO_2 keletkezik, a felszabaduló hő pedig fenntartja az égést. Az elhalt erdei növények bomlása a talajon szénatomjaik lassú reakciója a levegő oxigénjével, amely az energiafelszabadulás mellett szintén CO_2 -t juttat az atmoszférába.

A légköri O_2 főleg a fotoszintézis során keletkezik: a növényekben található kloroplasztok³⁹ (11. fejezet) a napfény energiáját használják a CO_2 molekula C atomra és O_2 molekulára bontására. A

³⁹ Kloroplasztok az algákban és a tengeri cianobaktériumokban is vannak, és fotoszintézis is zajlik bennük. Egyszerűsített leírásomban mindkettőt növényi létformaként kezeltem. (Bizonyos értelemben a cianobaktérium a kloroplaszt egy formája.)

felszabadult O_2 a légkörbe kerül, míg a szénből, valamint a víz hidrogénjéből és oxigénjéből a növekedésükhöz szükséges szénhidrátokat állítanak elő a növények.

Az O_2 pusztulása és a CO_2 -mérgezés

Tegyük fel, hogy az evolúció eredményeként olyan patogén jön létre, amely elpusztítja a kloroplasztokat, ahogyan azt Meyerowitz az előző fejezet végén felvetette. A fotoszintézis emiatt le fog állni, persze nem egyszerre, hanem fokozatosan, amint a növények fogyatkoznak. Nem keletkezik több O_2 , viszont a légzés, az égés és főként a bomlási folyamatok következtében a meglévő mennyisége csökken. Az emberiség megmaradt részének nagy szerencséjére nincs elég bomló növényi maradvány a földfelszínen ahhoz, hogy a folyamat a légkör teljes O_2 -tartalmát eltüntesse.

A bomlási folyamatok harminc éven belül az O_2 mindössze 1 százalékának felhasználásával nagyrészt befejeződnének. Bőven maradna még lélegeznivaló Cooper gyermekeinek és unokáinak is, feltéve, hogy lesz mit enniük.

De a légköri O_2 1 százaléka szén-dioxiddá fog alakulni, ami azt jelenti, hogy az atmoszféra 0,2 százaléka CO_2 lesz. (Azért ennyi, mert a légkör 80 százalékban nitrogénből áll.) Ez pedig éppen elegendő mennyiségű CO_2 ahhoz, hogy megnehezítse az erre érzékeny emberek légzését, és az üvegházhatás által körülbelül 10 fokkal megemelje a Föld átlaghőmérsékletét, ami enyhén szólva is mindenki számára kellemetlen lenne!

Ahhoz, hogy mindenki csak nagy nehézségek árán tudjon lélegezni, és az összes emberen „álomkór” vegyen erőt, tízszer több légköri O_2 -nek kellene CO_2 -vé alakulnia. Minden ember megmérgezéséhez pedig ezen mennyiség ötszörösének, a légkör jelenlegi oxigéntartalma felének kellene átalakulnia. Nem ismerek olyan hihető okot, amely miatt ez bekövetkezhetne.

Brand professzor tehát tévedett? (Még az elméleti fizikusok is tévedhetnek. De mennyire, és mekkorát. Én csak tudom, mivel én is az vagyok.) Igen, valószínűleg tévedett, de az is lehet, hogy nem. A professzornak *akár* igaza is lehet, ez azonban a geofizikusok egyetértését igényelné abban a kérdésben, hogy vajon komoly mértékben megbolygathatja-e valamilyen folyamat a tengerfenéki üledéket.

Mind az óceánok fenekén, mind a szárazföldön található el nem bomlott szerves anyag. A geofizikusok becslése szerint tengerfenéki mennyisége a szárazföldinek mintegy huszada. *Ha* nem lenne igazuk, és az óceánokban, mondjuk, ötször több lenne, mint a szárazföldön, valamint *ha* létezne valamilyen mechanizmus, amely hirtelen a felszínre is hozná ezt a szerves anyagot, akkor a bomlása eredményeként eltűnő O_2 és megjelenő CO_2 tényleg mindenkit elpusztítana.

Néhány évezredenként valamilyen instabilitás hatására az óceánok átkeverednek. A felszíni víztömegek lesüllyednek, a fenéken lévők pedig felemelkednek. Elképzelhető, hogy Cooper korában ez az átkeveredés olyan erőteljes, hogy a felfelé áramló víztömegek magukkal hozzák az óceáni fenék szerves anyagát. Hirtelen levegőre kerülve ez az anyag elbomlik, halálos mennyiségű CO_2 -vé alakítva a légköri O_2 -t.

Igen, elképzelhető. De nagyon valószínűtlen, két okból kifolyólag is: szinte kizárt, hogy ezerszer annyi el nem bomlott szerves anyag legyen az óceánok fenekén, mint ahogyan azt ma a geofizikusok gondolják, és annak is nagyon kicsi a valószínűsége, hogy a szükséges erősségű feláramlás előálljon.

Mindezek ellenére a *Csillagok között*-ben a Föld visszafordíthatatlanul haldoklik, és az emberiségnek új otthon után kell néznie. A Földtől eltekintve a Naprendszer lakhatatlan, így a kutatásnak a Naprendszeren kívül kell folytatódnia.

13. Csillagközi utazás

Első találkozásukkor Brand professzor azt mondja Coopernek, a Lázár missziót küldték ki, hogy új otthon után kutasson az emberiség számára. Cooper erre így felel: „A Naprendszer egyetlen bolygója sem lakható, és a legközelebbi csillagig több mint ezer évet kell utazni. Szóval az sem kecsegtet sok reménnyel. Hova utaztak?”

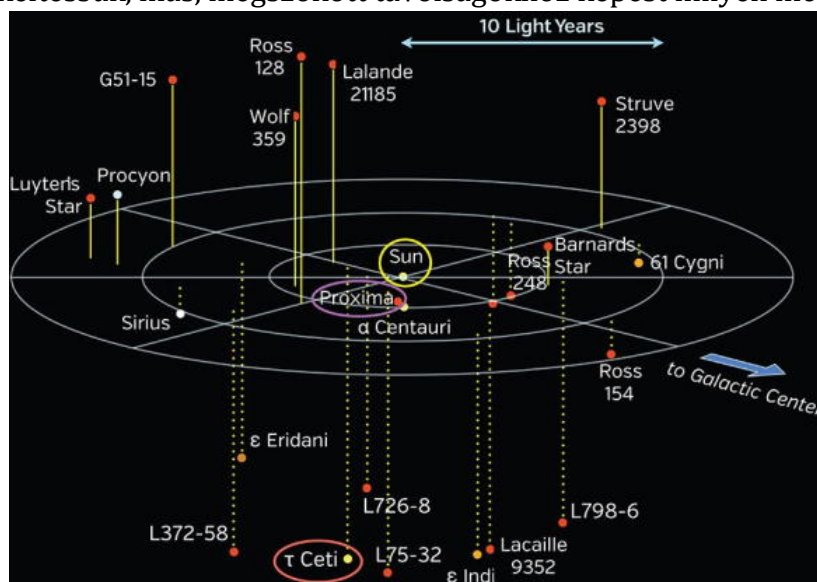
A kihívás reménytelen volta - már ha nincs egy féregjáratunk -teljesen nyilvánvaló, ha rájövünk, milyen messze is vannak a legközelebbi csillagok (13.1. ábra).

A legközelebbi csillagok távolsága



A Naphoz legközelebbi csillag, amelyről úgy gondoljuk. Hogy van lakható bolygója, a τ Ceti. Távolsága 11,9 fényév, azaz fénysebességgel utazva is 11,9 évre lenne szükségünk, hogy elérjük. Ha lenne is közelebbi lakható bolygó, az sem lehet sokkal közelebb nála.

Csak hogy érzékeltsük, más, megszokott távolságokhoz képest milyen messze van a τ Ceti,



13.1. ábra

A Föld 12 fényév sugarú környezetében található összes csillag. A Napot sárga, a Proxima Centaurit bíbor, a τ Cetit pedig vörös kör jelöli [A térkép Richard Powell honlapjáról származik www.atlasoftheuniverse.com.]

óriási mértékben csökkentsük le léptékünket. Képzeljük el, hogy távolságát New York és az ausztráliai Perth közöttinek feleltetjük meg, ami a Föld kerületének körülbelül fele.

A Naprendszerhez legközelebbi csillag, a Proxima Centauri 4,24 fényévre van tőlünk, nincs azonban semmilyen bizonyíték arra, hogy lenne lakható bolygója. Ha a τ Ceti távolsága a New York-Perth-távolságnak felel meg, akkor a Proxima Centaurié a New York és Berlin közöttinek. Nincs sokkal közelebb, mint a τ Ceti!

Összehasonlításként: a legmesszebb járó, ember alkotta űreszköz, a csillagközi térbe küldött *Voyager-1* szonda jelenleg 18 fényóra jár a Földtől. Harminchét évbe került, mire idáig jutott. Erősen lecsökkentett léptékű világunkban a *Voyager-1* körülbelül 3 kilométerre van a Földtől, ami az Empire State Building és Greenwich Village déli szélé közötti távolság, sokszorta kisebb, mint New York és Perth között.

A Föld és a Szaturnusz távolsága még ennél is kisebb: 200 méter, ami New York Cityben két kelet-nyugati tömb távolsága az Empire State Building és a Park Avenue között. A Földtől a Marsig csak 20 méter, míg a Föld és a Hold közötti, ember által valaha megtett legnagyobb távolság mindössze 7 centiméter - körülbelül két és fél hüvelyk!

Hasonlítsuk össze a Hold két és fél hüvelykes távolságát azzal a kihívással, hogy *jussunk el a Föld másik felére*. Világos, hogy az emberiségnek óriási technikai fejlődésre van szüksége a Naprendszeren kívüli lakható bolygók eléréséhez.

Utazási idő a 21. század technológiájával



A *Voyager-1* a Jupiter és a Szaturnusz gravitációs lendítése után 17km/s sebességgel halad kifelé a Naprendszerből. A *Csillagok között*-ben az *Endurance* 20km/s átlagos sebességgel két év alatt ér a Földtől a Szaturnuszig. Úgy vélem, hogy a 21. században a naprendszerbeli objektumok gravitációs lendítő hatását is kihasználó rakétatechnika által elérhető legnagyobb sebesség 300km/s körül lesz.

Ekkora sebességgel haladva 5000 évre lenne szükségünk a Proxima Centauri és 13000 évre a τ Ceti eléréséhez. Nem túl rózsás kilátások!

Ahhoz, hogy a 21. században sokkal gyorsabbak legyünk, valami másra van szükségünk, például egy féregjáratra (14. fejezet).

A távoli jövő technológiája



Műszakilag kiválóan képzett tudósok és mérnökök hada óriási erőfeszítéseket tesz annak érdekében, hogy már ma felvázolhassák a távoli jövő azon technológiáit, amelyek segítségével közel fénysebességgel utazhatunk majd. Ötleteikről sok mindent megtudhatunk a világhálót

böngészve. Úgy vélem, az emberiségnek több évszázadába telik még ezek bármelyikének megvalósítása. Arról azonban meggyőztek, hogy rendkívül fejlett civilizációk valószínűleg a fénysebesség tizedével vagy még gyorsabban is utazhatnak a csillagok között.

Íme három elképzelt lehetőség a fényhez közeli sebességgel történő hajtásra, amelyek felkeltették a kíváncsiságomat.

Termonukleáris fúzió



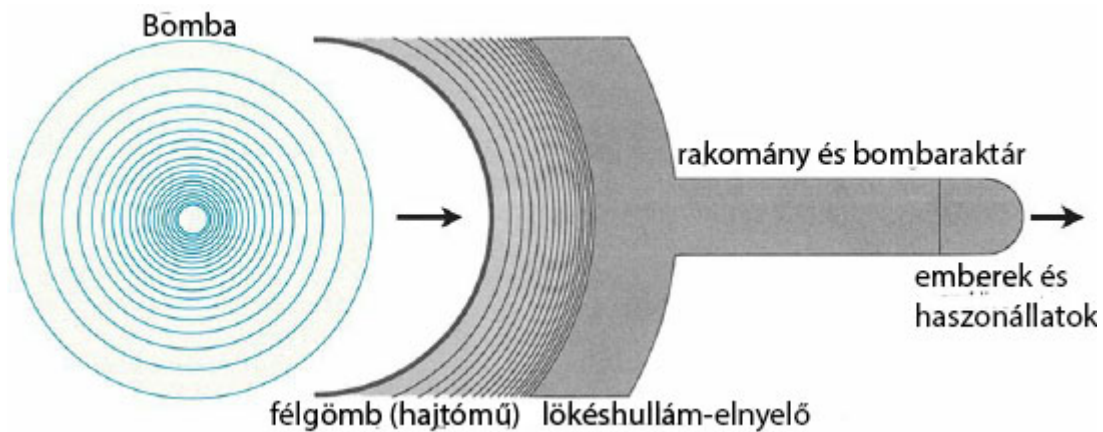
A három elképzelés közül legelfogadottabb a termonukleáris fúzió. A szabályozott fúzió alapuló földi erőművekkel kapcsolatos kutatások és fejlesztések az 1950-es években kezdődtek, de 2050 előtt biztosan nem várható használható eredmény ⁴⁰. Egy egész évszázadnyi kutatás és fejlesztés! Reális mérőszáma a nehézségeknek.

De mit jelent az űrbéli fúziós meghajtás szempontjából, ha 2050-ben működni fognak az első ilyen erőművek? A legjobb tervek is csak 100 km/s sebességet ígérnek, és talán 300 km/s érhető el az évszázad végére. A fúzió kihasználásának teljesen új megközelítése szükséges, ha a fényéhez közeli sebességet akarunk elérni.

A fúzióban rejlő lehetőségeket már egy egyszerű számítás is jól érzékelteti: Ha két deutériummag (a nehézhidrogén magja) hélium-maggá egyesül, nyugalmi tömegük 0,0064 része (körülbelül 1 százaléka) alakul energiává. Ha az egész a héliummag mozgási energiájának növelésére fordítódna, az a fénysebesség tizedére gyorsulna ⁴¹. Ez azt jelenti, hogy ha a deutériumból álló üzemanyagban rejlő fúziós energiát teljes egészében az űreszköz gyorsítására tudnánk használni, akkor a fénysebesség közel tizedét érhetnénk el - esetleg kicsit többet, ha ügyesek vagyunk.

⁴⁰ Kissé szarkasztikusan fogalmazva 1950 óta folyamatosan 50 évre vagyunk a szabályozott termonukleáris fúzió (gazdaságos) energiatermelésre való felbasználásától.

⁴¹ A mozgási energia $Mv^2/2$, ahol M a héliummag tömege, v pedig a sebessége. Ez a mozgási energia legyen egyenlő a fúzió közben felszabaduló $0.0064 Mc^2$ energiával, ahol c a fény sebessége. (Einstein híres, a tömeg és energia ekvivalenciáját leíró egyenletét használtam, amely szerint a felszabaduló energia a tömegkülönbség szorozva a fénysebesség négyzetével.) A két egyenletből $v^2 = 2 \cdot 0,0064 c^2$, azaz v közel $c/10$.



13.2. ábra.

Freeman Dyson bombákkal hajtott rendszere [Dyson 1968]

1968-ban az általam rendkívüli módon tisztelt briliáns fizikus, Freeman Dyson felvázolta egy olyan hajtásrendszer alapjait, amely egy kellően fejlett civilizáció kezében lehetővé tenné ekkora sebesség elérését.

Elképzelése szerint egy 20 kilométer átmérőjű, félgömb alakú lökeshullám-elnyelő mögött termonukleáris bombákat (hidrogénbombákat) robbantanának. Az űrhajót a robbanások „törmeléke” gyorsítaná, Dyson optimista becslése alapján egészen a fénysebesség harmincadáig. Kifinomultabb tervezés esetén talán még tovább is. 1968-ban Dyson úgy gondolta, hogy a gyakorlatban ez a hajtás a huszoneketedik század utolsó harmada előtt, azaz mostantól 150 éven belül nem lesz megvalósítható. Szerintem ez nagyon is optimista becslés.

Lézernyaláb és napvitorla

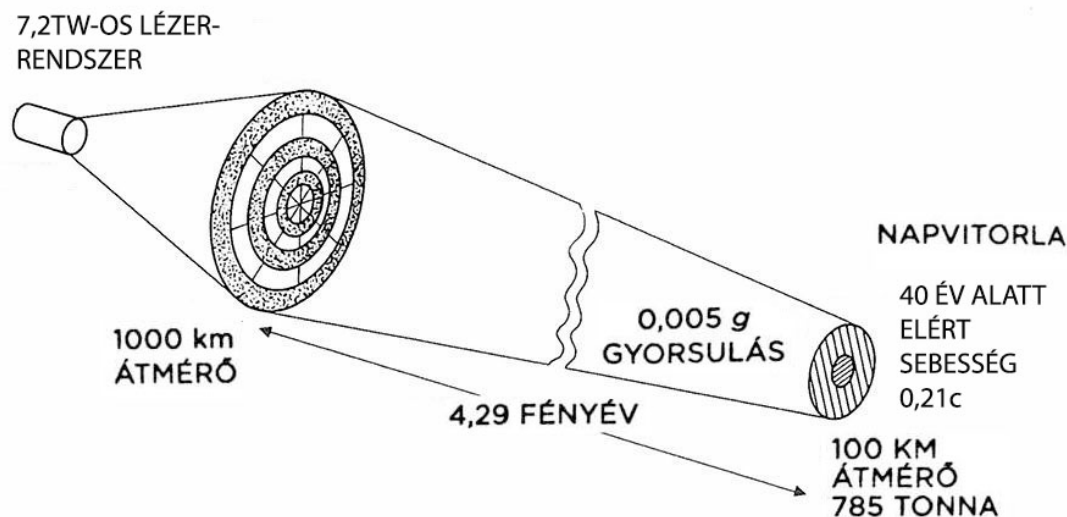


1962-ben egy általam szintén nagyra becsült másik fizikus, Robert Forward rövid cikket jelentetett meg egy népszerű magazinban egy olyan űrhajóról, amelyet távolról a vitorlájára fókuszált lézernyaláb hajt (Forward 1962). Egy 1984-es szakcikkből már sokkal pontosabban és részletesebben mutatta be a koncepcióját (13.3. ábra).

Az elképzelés szerint az űrben vagy a Holdon elhelyezett, napenergiával működtetett lézerrendszer 7,2 terawattos nyalábot (ez az Egyesült Államok 2014-es teljes energiaszükségletének kétszerese!⁴²) generál, amelyet egy 1000 kilométer átmérőjű Fresnel-lencsével fókuszálnak a sokkal kisebb tömegű távoli űreszköz 100 kilométer átmérőjű, körülbelül

⁴² Ezt nyilván úgy kell érteni, hogy az adott teljesítményt egy éven keresztül folyamatosan leadva állhatna elő az USA 2014-es teljes energiaszükséglet kétszerese. *(A fordító megjegyzése)*

1000 metrikus tonna tömegű vitorlájára. (A nyalábirány pontosságának az ívmásodperc milliomod részével kell megegyeznie.) A nyaláb fénynyomása tolná és gyorsítaná a vitorlát és vele az űreszközt a fénysebesség ötödére a Proxima Centauriig tartó négyéves út feléig. Az út második felében az elrendezés megfelelően módosított változata lassítaná le a hajót a bolygóval történő találkozáshoz szükséges sebességre. (Próbálkozzunk meg a lassítás módjának kitalálásával!)



13.3. ábra.

Robert Forward lézernyalábon és napvitorlán alapuló meghajtórendszere [forward 1934]

Dysonhoz hasonlóan Forward is a 22. században gondolta megvalósíthatónak az ötletét. Ha a technikai kihívásokat nézem, én ezt is későbbre teszem.

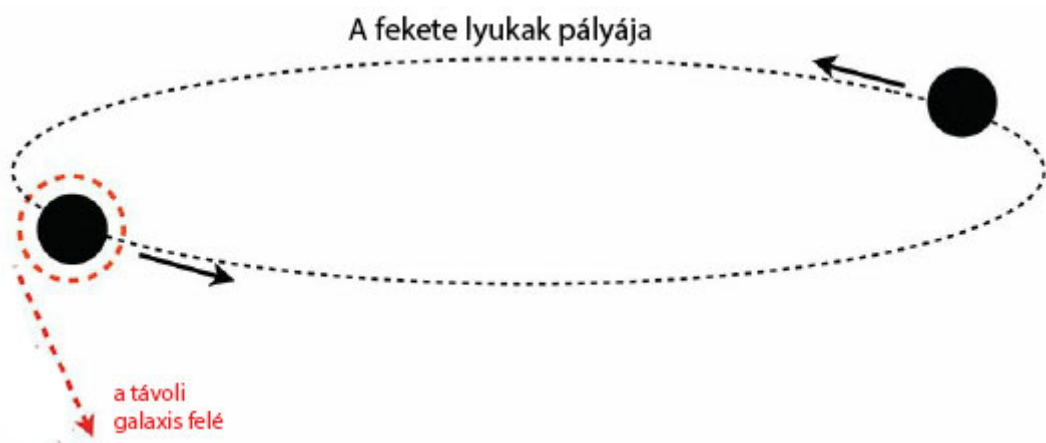
Gravitációs lendítés kettős fekete lyukkal



Harmadik példám Dyson 1963-as ötletének általam módosított vad - de mennyire vad! - változata.

Tegyük fel, hogy közel fénysebességgel néhány év alatt szeretnénk átszelni szinte az egész univerzumot (azaz nemcsak csillagközi, hanem intergalaktikus utazásról van szó). Ezt két, egymás körül keringő fekete lyukkal, azaz egy kettős fekete lyukkal meg is tehetjük. A két objektumnak nagyon elnyúlt pályán kell keringenie és elég nagynak kell lennie ahhoz, hogy árapályerőik ne szaggassák szét a hajónkat.

Kémiai vagy nukleáris üzemanyagot használva kormányozzuk űrhajónkat olyan pályára, amelyen közel kerülhet az egyik fekete lyukhoz: ez az ún. ráközelítő-pörgő (zoom-whirl) pálya (13.4. ábra). A hajónk először megközelíti a fekete lyukat (zoom in), kötött pályán megtesz néhány gyors fordulatot körülötte (whirl), majd amikor a lyuk majdnem pontosan a kísézője felé mozog, a hajó eltávolodik tőle (zoom out), átmegy a kíséző fekete lyukhoz (zoom in), és körülötte áll gyors pályára (whirl). Ha a két fekete lyuk még mindig egymás felé halad, akkor ezt gyorsan meg kell szakítani, és vissza kell térni az elsőhöz. Ha a két lyuk már nem egymás felé mozog, akkor hosszabb ideig kell ezen a pályán parkolni, egészen addig, míg ismét elő nem áll a kedvező helyzet, ekkor viszont vissza kell indulni az első lyukhoz. Így mindig csak akkor repülünk a két lyuk között, amikor azok egymás felé közelítenek, ezért hajónk egyre nagyobb sebességre gyorsul. Ha a kettős pályája eléggé elliptikus, ezzel a módszerrel tetszőlegesen megközelíthetjük a fénysebességet.



13.5. ábra.

A kritikus pálya elhagyása és indulás a távoli galaxis felé

Figyelemre méltó, hogy csak ahhoz kell kis mennyiségű rakéta-hajtóanyag, hogy a lyukak körüli tartózkodási időnket megszabhassuk. Kulcsfontosságú a fekete lyuk körüli kritikus pályára történő navigálás és a lyuk körüli keringés ellenőrzött végrehajtása. A kritikus pályát a 27. fejezetben tárgyalom. Most csak annyit érdemes megjegyezni, hogy ez egy rendkívül instabil pálya. Olyan, mintha egy vulkán sima peremén motorkerékpároznánk. Ha ügyesen egyensúlyozunk, akármeddig a peremen maradhatunk. Ha el akarjuk hagyni azt, a motor kormányát enyhén elmozdítva megtehetjük. Ugyanígy, ha el akarjuk hagyni a kritikus pályát, a rakéta kis tolóereje is elegendő, hogy a kicsit megnövekvő centrifugális erőnek köszönhetően elhagyjuk a fekete lyuk körüli pályát, és elinduljunk a másik felé.

Ha olyan közel kerültünk a fénysebességhez, ahogyan szeretnénk volna, búcsút inthetünk a rendszernek, és elindulhatunk az univerzum távoli részében található galaxiscélpontunk felé (13.5. ábra).

Az utazás a 10 milliárd fényéves távolságnak megfelelően hosszú lesz. De ha közel fénysebességgel mozgunk, a saját időnk nagyon lelassul a földihez képest. Ha a fényéhez elég



13.6. ábra.

Lassítás a célnál egy másik kettős fekete lyuk segítségével

közele sebességgel haladunk, saját időnk szerint néhány év vagy még rövidebb idő alatt elérhetjük a célunkat, ahol egy másik kettős fekete lyuk segítségével lassulhatunk le, már ha találunk egyet! Lásd a 13.6. ábrát.

Ugyanezzel a módszerrel térhetünk haza is. Érkezésünk azonban nem lesz feltétlenül kellemes. Otthon évmilliárdok teltek el, miközben mi csak néhány évet öregedtünk. Képzeljük el, mit találnánk!

Az ilyen típusú gravitációs hintamanőverek megteremthetik annak lehetőségét, hogy egy civilizáció az intergalaktikus űr hatalmas távolságait áthidalva terjeszkedjen. A legfőbb (meglehet, legyőzhetetlen) akadálya ennek, hogy megtaláljuk vagy megcsináljuk a szükséges kettős fekete lyukat. Az indító kettős létrehozása talán nem okozhat problémát egy kellően fejlett civilizációnak, a lassító kettős azonban már mis ügy.

Mi történhet velünk, ha nincs lassító kettős, vagy van, de rosszul célzunk és eltévesztjük? Ravasz kérdés ez az univerzum tágulása miatt. Gondoljuk csak meg!

Amennyire izgalmasnak tűnnek a távoli jövő eme hajtóműrendszerei, annyira vesznek valóban a távoli jövő kódébe. Huszonegyedik századi technológiával évezredekre vagyunk más naprendszerek elérésétől. Egy földi katasztrófa esetén egyetlen (nagyon halvány) reményünk a gyorsabb csillagközi utazásra egy féregjárat, mint a *Csillagok között*-ben, vagy a téridőgörbület valamilyen más extrém formája.

IV.A FÉREGJÁRAT

14. Féregjáratok

Hogyan kapták a féregjáratok a nevüket?



Az asztrofizikai féregjáratok (vagy féreglyukak) mesteremtől, John Wheelertől kapták nevüket, akinek az ötlet a kukacos almákról jutott eszébe. Egy almán mászkáló hangya számára az alma felszíne jelenti az egész univerzumot. Ha azonban az almát átfúrta egy kukac, a hangya már két módon juthat el a tetejétől az aljáig: a külső részén (saját univerzumában) körbejárva vagy a féreg által fúrt járaton keresztül. A hangya univerzumának két pontja között a féregjáraton át vezető út a rövidebb.

14.1 ábra.

Egy hangya felfedezi a féreg járta almát

Az alma finom belseje, amelyen keresztül a féregjárat halad, nem része a hangya univerzumának, az egy háromdimenziós befoglaló tér vagy hipertér (4. fejezet).

A féregjárat falát már tekinthetjük annak, mivel dimenziója ugyanaz (kettő), mint a hangya univerzumának (az alma felszínének), amelyhez csak a féregjárat bejáratánál kapcsolódik. Más nézőpontból viszont a féregjárat fala nem része a hangya világának, csak egy rövidebb út, amelyen a hangya a befoglaló térben átkelhet saját univerzuma egyik pontjából egy másikba.



A Flamm-féle féregjárat

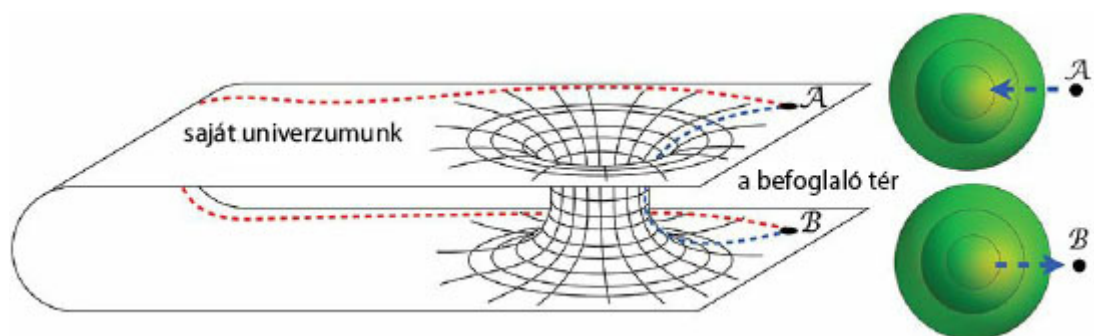


1916-ban, mindössze egy évvel azután, hogy Einstein végső matematikai formájukba öntötte az általános relativitáselmélet törvényeit, egy bécsi fizikus, Ludwig Flamm megtalálta az Einstein-egyenletek azon megoldását, amely a féregjáratokat írja le (ő persze még nem így nevezte azokat). Ma már tudjuk, hogy az Einstein-egyenletek sokféle (különböző alakú és tulajdonságú) féregjárat létezését engedik, de a Flamm által felfedezett az egyetlen, amelyik gömbszimmetrikus és nem tartalmaz gravitáló anyagot. Ha vesszük a Flamm-féle féregjárat egy egyenlítői metszetét, azaz mind a féregjáratnak, mind saját univerzumunknak (bránunknak) csak két dimenziójával foglalkozunk a három helyett, és ezeket a befoglaló térből nézzük, akkor a 14.2. ábra bal oldalához hasonló képet láthatunk.

Az ábráról univerzumunk egyik dimenzióját elhagyva kétdimenziós lénynek kell magunkat tekintenünk, aki csak a meghajlított papírlapon vagy a féregjárat kétdimenziós falán tud mozogni. Univerzumunk A pontjából B pontjába kétféle módon juthatunk el: a féregjárat falán lefelé (szaggatott kék vonal) vagy a hosszabb úton (szaggatott piros vonal) a meghajlított papírlapon, saját világunkban.

Természetesen univerzumunk valójában háromdimenziós. A 14.2. ábra bal oldalának koncentrikus körei a valóságban a jobb oldalon látható zöld gömbök. Amint az A pontból indulva a kék trajektória mentén áthaladunk a féregjáraton, egyre kisebb és kisebb gömbökön megyünk keresztül. A koncentrikusan egymásba ágyazott gömbök területének csökkenése azonban egyszer csak megáll, és újra elkezdi növekedni, amint a féregjáratot a B pont irányában elhagyjuk.

Tizenkilenc éven keresztül a fizikusok viszonylag kevés figyelmet szenteltek az Einstein-egyenletek eme „szörnyű” megoldásának, a Flamm-féle féregjáratnak. 1935-ben azonban - Hamm munkáját nem ismerve - Nathan Rosen fizikus kollégájával együttműködve maga Einstein is



14.2. ábra.

A Flamm-féle féregjárat.

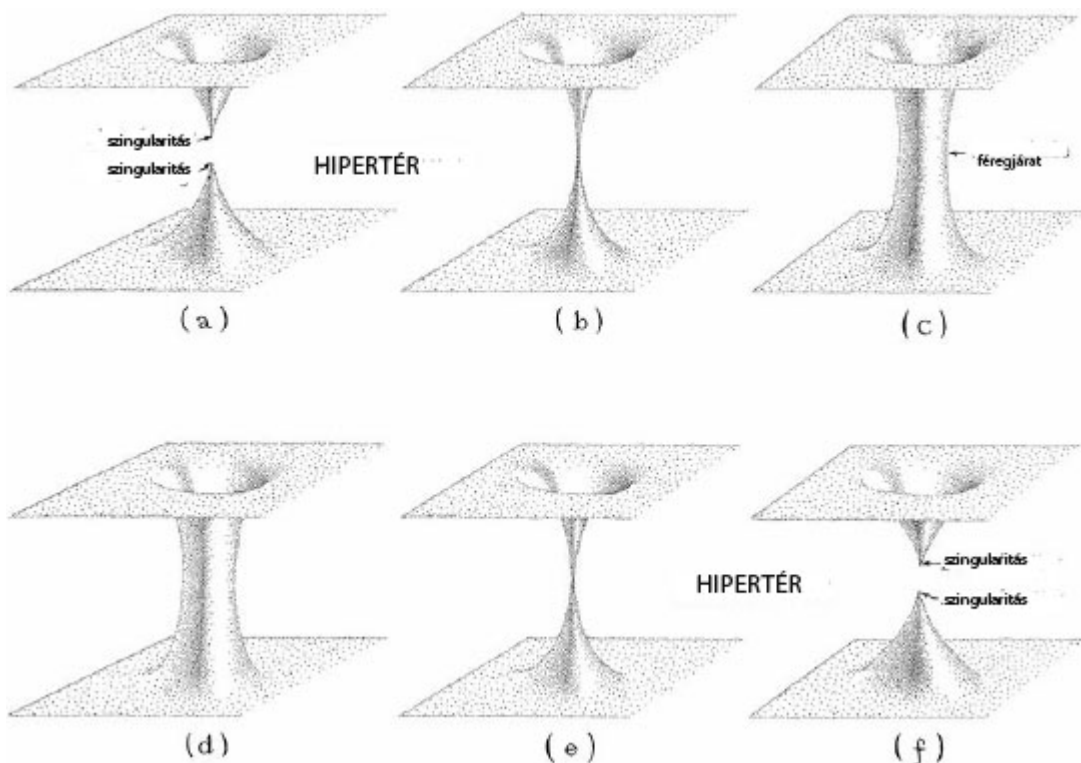
felfedezte a Hamm-féle megoldást, feltárták annak tulajdonságait, és a valódi világban betöltött lehetséges szerepéről is eltűnődtek. Más fizikusok, akik szintén nem ismerték Hamm eredményét, elkezdtek a megoldást „Einstein-Rosen-híd” néven emlegetni.

A féregjárat összeomlása



Az Einstein-egyenletekből matematikai módszerekkel nyert előrejelzések teljes megértése egyáltalán nem könnyű feladat. Jó példa erre a Flamm-féle féregjárat. 1916-tól 1962-ig, azaz majdnem fél évszázadon keresztül a fizikusok úgy vélték, hogy a féregjárat statikus, örökké változatlan. Ekkor azonban John Wheeler és tanítványa, Robert Fuller rájöttek, hogy nem így van. A probléma matematikai hátterét alaposan megvizsgálva felfedezték, hogy a féregjárat létrejön, tágul, összehúzódik, majd végül eltűnik, ahogyan azt a 14.3. ábra mutatja.

Kezdetben, az ábra (a) részén, két szingularitás alakul ki univerzumunkban. Az idő múlásával ezek a befoglaló térben elérik egymást, és létrejön a féregjárat (b). A kerülete elkezd nőni, azaz a féregjárat tágul, lásd (c) és (d), majd ismét elkezd összehúzódni, befűződik és szétszakad (e),



14.3. ábra.

A Flamm-féle féregjárat (Einstein-Rosen-híd) dinamikája

(MATT ZIMET vázlatomon alapuló rajza a *Black Holes & Time Warps Einstein's Outrageous legacy* című könyvemből)

ennek eredményeként pedig végül újra két szingularitás marad vissza (f). Születése, tágulása, összehúzódása és szétszakadása olyan gyorsan zajlik, hogy semminek, még a ténynek sincs ideje átjutni egyik oldalról a másikra. Bármi vagy bárki, aki megkísérelné az átjutást, megsemmisülne a szétszakadáskor!

Ez a kimenetel elkerülhetetlen. Ha az univerzumban valamilyen módon valaha is létrejönne egy gravitáló anyagot nem tartalmazó gömbszimmetrikus féregjárat, pontosan így viselkedne, Einstein relativisztikus törvényeinek megfelelően.

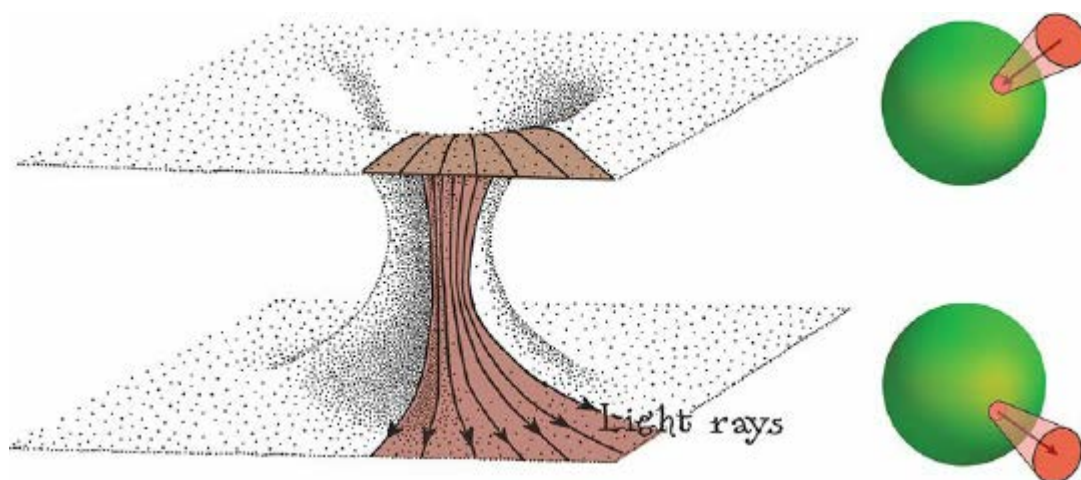
Wheeler nem csüggött el a következtetéstől, ellenkezőleg, az felvillanyozta. A szingularitásokra (azokra a helyekre, ahol a tér és az idő görbülete végtelenné válik) a fizikai törvények „válsággócaiként” tekintett. A válság pedig csodálatos tanítómester. Okosan kezelve bepillantást nyerhetünk a fizikai törvények lényegébe. A 26. fejezetben még visszatérek erre.

Kapcsolat



Ugorjunk előre negyed évszázadot, 1985 májusáig, amikor Carl Sagan felhívott, és megkért, hogy készülő, Kapcsolat című regényét nézzem át abból a szempontból, mennyire felel meg a relativitáselmélet törvényeinek. Örömmel mondtam igent. Közeli barátok voltunk, és úgy gondoltam, számomra szórakoztató lesz, ráadásul lekötöztetett azzal, hogy bemutatott Lynda Obstnak.

Carl elküldte a kéziratát. Elolvastam, és rögtön beleszerettem. De akadt vele egy kis probléma. Hősnőjét, dr. Eleanor Arrowayt egy fekete lyukon keresztül küldte a Naprendszerből a Vega csillaghoz. Én azonban tudtam, hogy egy fekete lyuk belseje nem vezethet innen a Vegáig, sőt egyáltalán nem vezet sehova sem az univerzumunkban. A fekete lyuk eseményhorizontjának átlépése után dr. Arroway a szingularitás áldozata lett volna. A Vega gyors eléréséhez egy féregjáratra lett volna szüksége, nem fekete lyukra. De olyanra, amelyik nem szakad szét. *Átjárható* féreglyukra.



14.4. ábra.

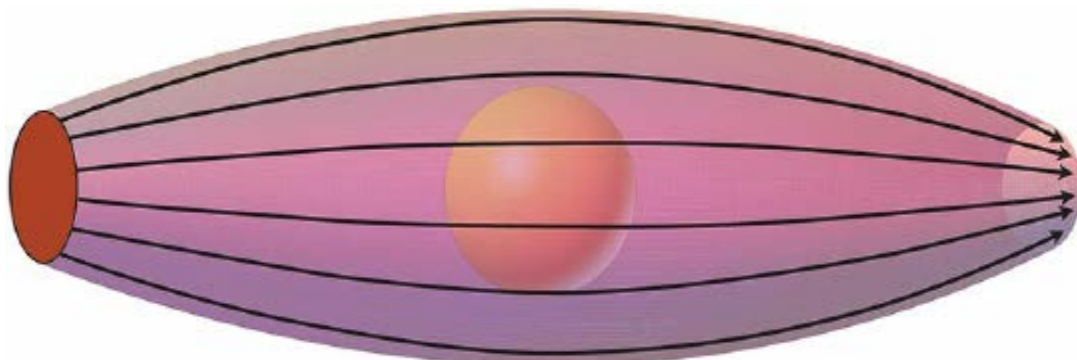
Egy sugárirányú fénynyaláb áthaladása egy gömbszimmetrikus, átjárható féreglyukon. Balra: A befoglaló térből nézve egy térdimenzió elhagyásával. Jobbra: Saját univerzumunkból nézve. (MATT ZIMET vázlatomon alapuló rajza a Black Holes & Time Warps Einstein's Outrageous legacy című könyvéből)

Feltettem tehát a kérdést magamnak: Mit kellene a Flamm-féle féreglyukkal tennem, hogy megóvjam a szétszakadástól, és nyitva tudjam tartani, hogy átjárható legyen? A választ egy egyszerű gondolat kísérlet adta meg.

Tegyük fel, hogy van egy féregjáratunk, amelyik gömbszimmetrikus, mint a Flamm-féle, de nem szakad szét. Sugárirányban küldjünk egy fénynyalábot bele. Mivel a nyaláb minden fénysugara radiálisan halad, alakjának olyannak kell lennie, mint amelyet a 14.4. ábrán láthatunk. A féregjáratba belépve a fénysugarak összetartanak (a nyaláb keresztmetszete csökken), az

elhagyásakor pedig széttartanak (a nyaláb keresztmetszete nő). A féregjárat kifelé téríti el a fénysugarakat. miként egy szórólencse.

A gravitáló testek, például a Nap vagy egy fekete lyuk, a fénysugarakat befelé térítik el (14.5. ábra), kifelé nem. Ehhez az kellene, hogy a testnek negatív tömege (vagy a tömeg és az energia Einstein-féle ekvivalenciájának megfelelően negatív energiája) legyen. Ebből az alapvető



14.5. ábra

A Nap vagy egy fekete lyuk befelé téríti el a fénysugarakat

tényből azt a következtetést vontam le, hogy bármely átjárható, gömbszimmetrikus féregjárat valamiféle olyan anyagban nyílhat csak, amelynek negatív energiája van. Vagy legalábbis negatívnak kell érzékelnie a fénynyalábnak, vagy bárminek, bárkinek, aki fényhez közeli sebességgel halad át a féregjáraton⁴³. Az ilyen tulajdonságú közegre az „egzotikus anyag” kifejezést használok. (Később megtudtam, hogy az Einstein-féle relativisztikus törvényeknek megfelelően minden fér gjárat, akár gömbszimmetrikus, akár nem, csak akkor átjárható, ha ilyen egzotikus anyag alkotja. Az egész Dennis Gannon [University of California, Davis] 1975-ös tételéből következik. Sajnos nem voltam kellően tájékozott, így akkor még nem ismertem a Gannon-tételt.)

Meglepő, de a kvantumfizika furcsa törvényeinek köszönhetően ilyen egzotikus anyag létezhet. Igaz, hogy kis mennyiségben, de még fizikai laboratóriumokban is sikerült előállítani, mégpedig két, egymáshoz közel elhelyezett elektromosan vezető lemez között. Ez az ún. Casimir-effektus. 1985-ben azonban egyáltalán nem volt világos előttem, vajon egy féregjárat tartalmazhat-e *elegendő* egzotikus anyagot ahhoz, hogy nyitva maradjon. Két dolgot tettem.

Először is írtam egy levelet Carl barátomnak, amelyben javasoltam, hogy Eleanor Arrowwayt fekete lyuk helyett egy féregjáraton keresztül küldje a Vegához. Csatoltam azokat a számításaimat is, amelyekkel igazoltam, hogy a féregjáratnak egzotikus anyagból kell állnia.

⁴³ Az energia furcsán viselkedik a relativisztikus fizikában: mért értéke függ attól, hogy milyen irányban és mekkora sebességgel mozog az, aki méri.

Carl elfogadta a javaslatomat (és meg is említette az egyenleteimet a regény köszönetnyilvánításában). Így váltak a féregjáratok a modern sci-fi - regények, filmek, televízió - részévé.

Másodszor pedig két diákom, Mark Morris és Ulvi Yurtsever közreműködésével írtam két szakcikket az átjárható féreglyukokról. A cikkekben azon probléma elé állítottuk a kollégákat, hogy a relativisztikus és a kvantumtörvények kombinálása egy nagyon fejlett civilizáció számára vajon lehetővé tenné-e kellő mennyiségű egzotikus anyag összegyűjtését egy féregjáratban annak nyitva tartásához. Bár a kérdés sok fizikus még több kutatását inspirálta, még ma, harminc évvel később sem ismerjük a választ. A legtöbb érv amellett szól, hogy a válasz NEM, azaz átjárható féreglyukak nem létezhetnek. A végső megoldástól azonban még messze vagyunk. További részleteket Allen Everett és Thomas Roman fizikuskollégáim *Time Travel and Warp Drives* című könyvében (Everett-Roman 2012) olvashatunk.

A száj a kaliforniai sivatagban

A száj Dublinban



14.6. ábra.

Egy féregjárat két száján keresztül látható képek. resztül látható képek.

(A bal oldali fotó Catherine MacBride a jobb oldali pedig Mark Interrante felvétele)

Hogyan néz ki egy átjárható féreglyuk?



Hogyan néz ki egy átjárható féreglyuk saját univerzumunkból megfigyelve? Erre nem tudok határozott választ adni. Ha egy féregjáratot nyitva *lehet* tartani, a *hogyan* pontos részletei továbbra is homályban maradnak, így nem szerezhethetünk elegendő információt az alakjáról. A fekete lyukak esetében Roy Kerr azonban pontosan leírta a részleteket, így semmi akadály nem volt a 8. fejezetben tárgyalt konkrét előrejelzések megadásának.

A féregjáratokkal kapcsolatban tehát csak egy megalapozott feltételezéssel tudok szolgálni, ennek igazságáról azonban határozottan meg vagyok győződve. Ezért áll az a cím alatt.



Képzeli el, hogy van egy féregjáratunk itt a Földön, amely a befoglaló térben a dublini Grafton Street (Írország) és a dél-kaliforniai sivatag között ível. A két helyszín közötti távolság a féregjáraton keresztül mindössze néhány méter lehet.

A féregjárat bejáratait „szájaknak” hívják. Tegyük fel, hogy a kedves olvasó egy kávéházi teraszon ül a dublini száj mellett, én pedig a kaliforniai mellett állok a sivatagban. Mindegyik úgy néz ki, mint egy kristálygömb. Ha belenézek a kaliforniai szájba, a dublini Grafton Street eltorzított képét látom (14.6. ábra). Ezt a képet azok a fénysugarak állítják elő, amelyek a féregjáraton keresztül érkeznek Dublinból Kaliforniába, hasonlóan az üvegszálon át haladó fénysugarakhoz. Ma a kedves olvasó belenéz a dublini szájba, a kaliforniai-sivatag Józua-fáinak (kaktuszfák) torzított képét láthatja.

Létezhetnek-e természetes féregjáratok mint asztrofizikai objektumok?



„Féreglyukak nem keletkeznek csak úgy” - mondja Cooper a *Csillagok között*-ben. Teljes mértékben egyetértek vele! Ha a fizika törvényei meg is engedik átjárható féregjáratok létezését, teljesen valószínűtlennek tartom, hogy a valódi univerzumban spontán módon létrejönnének. Be kell azonban ismernem, hogy ez alig több spekulációnál. megalapozott feltételezésnek távolról sem mondható. Nevezzük talán nagyon megalapozott spekulációnak. De mindenkeppen spekuláció, ezért jelöltem ezt a részt az  szimbólummal.

Miért vagyok ilyen pesszimista a természetes féregjáratokkal kapcsolatban?

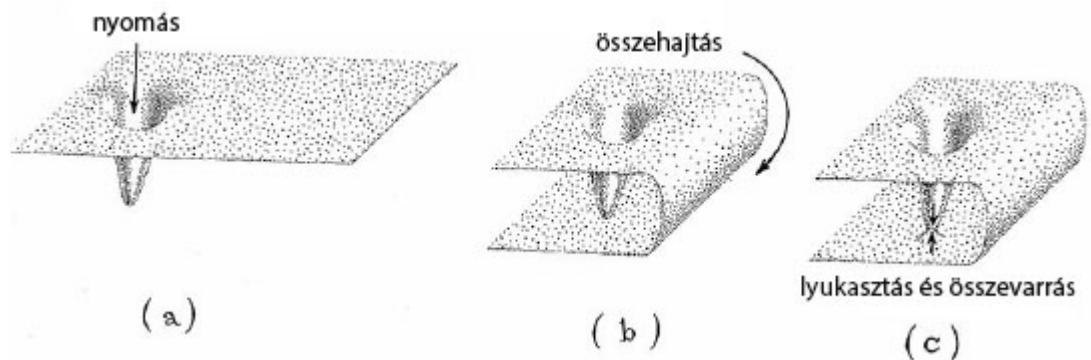
Nem ismerünk univerzumunkban olyan objektumokat, amelyek koruk előrehaladtával féregjáratokká válhatnának. A csillagászok azonban jelentős számban figyelnek meg olyan nagy tömegű csillagokat, amelyek fekete lyukakká roskadnak össze, amikor elfogy a nukleáris üzemanyaguk.

Kvantumhab (MATT ZIMET vázlatomon alapuló rajza a Black Holes & Time Warps Einstein's Outrageous legacy című könyvből)

Az 1950-es években John Wheeler meggyőző érvekkel támasztotta alá a kvantumhab létezésének szükségességét, de már arra is van bizonyíték, hogy a kvantumgravitáció törvényei elsimíthatják a habzást vagy meg is akadályozhatják a kialakulását.

Ha a kvantumhab valóban *létezik*, remélem, hogy van valamilyen természetes folyamat, amely a féregjáratait spontán módon emberi léptékűre vagy még nagyobbra növeli, és hogy ez történt az univerzum hihetetlenül gyors „felfúvódásakor” is, amikor világegyetemünk még nagyon-nagyon fiatal volt. Nekünk, fizikusoknak azonban egyáltalán nincs semmilyen arra utaló bizonyítékunk, hogy ez a természetes növekedés bekövetkezhet vagy bekövetkezhetett.

Másik halovány remény a természetes féregjáratok létezésére az ősrobbanás, amelyben univerzumunk született. Elképzelhető, de nagyon valószínűtlen, hogy magában az ősrobbanásban átjárható féreglyukak keletkeztek. Elképzelhető azon egyszerű oknál fogva, hogy még nagyon kevésbé értjük, mi is történt valójában az ősrobbanáskor. Valószínűtlen viszont azért, mert az ősrobbanásra vonatkozó jelenlegi ismereteink egyáltalán nem utalnak arra, hogy közben átjárható féreglyukak keletkeztek volna.



14.8. ábra.

Egy féregjárat létrehozása (MATT ZIMET vázlatomon alapuló rajza a *Black Holes & Time Warps Einstein's Outrageous legacy* című könyvemből)



14.9. ábra.

Romilly a féregjáratokat magyarázza. Balra: Meghajlítja egy papírt. Jobbra: A papírt átlukasztja egy ceruzával (féregjárat), összekötve így a két szélét (A *Csillagok között-ből*, a Warner Bros Entertainment engedélyével)

Létrehozhatnak-e féregjáratokat ultrafejlett civilizációk?



Egyetlen komoly reményem egy átjárható féreglyuk létrehozására egy ultrafejlett civilizáció léte. Azonban ők is hatalmas akadályokkal találnák szembe magukat, így igazából pesszimista vagyok.

Az egyik lehetőség egy féregjárat létrehozására ott, ahol előtte nem volt, a kvantumhabból való kihalászása (már ha a kvantumhab létezik), emberi léptékűre vagy nagyobbra növelése, és egzotikus anyaggal való feltöltése, hogy nyitva maradjon. Ez még egy ultrafejlett civilizáció számára is nagy feladatnak tűnik, bár lehet, hogy csak azért, mert még nem értjük a kvantumgravitáció törvényeit, amelyek a kvantumhabot, a féregjárat „kirántását” és a növesztés kezdeti fázisait kontrollálják (26. fejezet). Természetesen az egzotikus anyagról sincs túl sok fogalmunk.

Első látásra nem tűnik bonyolultnak egy féregjárat létrehozása (14.8. ábra). Csak nyomjuk a bránunk (univerzumunk) egy darabkáját a befoglaló térben lefelé, létrehozva így egy gyűszűt, majd a befoglaló térben hajlítsuk meg körülötte a bránunkat, lyukasszuk ki azt közvetlenül a gyűszű alatt, lyukasszuk ki magát a gyűszűt is, és varrjuk össze a két lyukat egymással. *Csak!*

A *Csillagok között*-ben Romilly ugyanezt magyarázza egy papírlap és egy ceruza segítségével (14.9. ábra). Nagyon egyszerűnek tűnik a ceruzával és a papírlappal, rettentően bonyolult azonban, ha a papírlap a bránunk, és a beavatkozást magából a bránból kell elvégeznie egy szintén ott létező civilizációnak. Tulajdonképpen ötletem sincs arra, miként lehetne bármelyik lépést is magából a bránból végrehajtani, az első, a benyomódás létrehozásának kivételével, ami csak egy nagy sűrűségű égitestet, például egy neutroncsillagot igényel. Továbbá ha a bránunk kilyukasztása egyáltalán lehetséges, az csak a kvantumgravitáció törvényei alapján történhet. Einstein relativisztikus törvényei ezt tiltják, ezért a lyukasztás csak a kvantumgravitáció birodalmában lehetséges, ahol az einsteini törvények már nem érvényesek. Ismét majdnem teljesen ismeretlen területen járunk (3.2. ábra).

Összegzés



Nem hiszem, hogy a fizika törvényei megengednék az átjárható féreglyukak létezését, de ez pusztán előítélet is lehet. Talán tévedek. Ha létezhetnek, akkor viszont abban kételkedem, hogy természetes módon létrejöhetnek a fizikai univerzumban. Létrehozásukra egyetlen lehetőségnek a mesterséges utat látom, mégpedig egy ultrafejlett civilizáció által. Semmit sem tudunk azonban

arról, hogyan is csinálná ezt ez a civilizáció. Kilátástalannak tűnik, legalábbis a saját bránunkból (univerzumunkból) nézve, még a legfejlettebb civilizációk számára is.

A *Csillagok között*-ben a féregjáratot mégis létrehozta, nyitva tartotta, és a Szaturnusz közelébe helyezte egy olyan civilizáció, amely a befoglaló térben él, egy civilizáció, amely lényeinek, a befoglaló térhez hasonlóan, négy térdimenziója van.

Ez már a teljesen ismeretlen terület. Ennek ellenére a 22. fejezetben foglalkozom a hipertér lényeivel. Közben azonban ejtsünk szót a *Csillagok között* féregjáratáról is.

15. A Csillagok között féregjáratának megjelenítése



A *Csillagok között* féregjáratát a történet szerint egy ultrafejlett, nagy valószínűséggel a hipertérben létező civilizáció hozta létre. Ennek szellemében, amikor Oliver James ⁴⁴ és én megterveztük, hogyan nézzen ki a filmben a féregjárat, ultraokos mérnököknek képzeltük magunkat. Feltételeztük, hogy a fizika törvényei megengedik a féreglyukak létezését, és azt is, hogy létrehozóinak rendelkezésére állt a féregjárat nyitva tartásához szükséges összes egzotikus anyag. Feltételeztük továbbá, hogy az építők a féregjáratban és körülötte is úgy tudták hajlítani a teret és az időt, ahogyan megkívántuk tőlük. Ezek eléggé szélsőséges feltételezések, ezért jelöltem ezt a fejezetet az  szimbólummal spekulációnak.

A féregjárat gravitációja és az időgörbület

Christopher Nolan azt akarta, hogy a féregjáratnak csak mérsékelt gravitációs vonzása legyen. Elég nagy ahhoz, hogy az Endurance űrhajót pályán tartsa maga körül, de kellően gyenge, hogy az Endurance rakétafúvókái segítségével le tudjon lassulni a féregjáratba történő „szelíd” belépéshez szükséges sebességre. Ez a Földénél jóval kisebb gravitációs vonzást jelent.

Az időgörbületre vonatkozó einsteini törvény szerint az idő lassulása a féregjáratban arányos annak gravitációs vonzásával. Mivel az a Földénél is gyengébb, az időlassulásnak is kisebbnek kell lennie a földinél, ami mindössze egymilliárdod résznyi (azaz egymilliárd másodperc - harminc év - alatt egy másodperc). Ez olyan kicsi, hogy Oliverrel a féregjárat tervezésekor egyáltalán nem vettük figyelembe.

⁴⁴ Emlékezzünk rá, hogy Double Negative vezető tudósaként Oliver James írta azt a számítógépes kódot, amelyik a *Csillagok között*-ben a féregjáratokat és a fekete lyukakat megjelenítette, lásd 1. és a 8. fejezetet.

„Mankók” a féregjárat alakjának beállításához

A féregjárat alakjával kapcsolatos végleges döntés a rendező Christopher Nolan és a vizuális effektusok felelőse, Paul Franklin kezében volt. Az én feladatomban arra korlátozódtott, hogy Olivernek és Double Negative-os kollégáinak olyan „mankókat” (szaknyelven paramétereket) szolgáltatassak, amelyek segítségével beállíthatják a kívánt alakot. A féregjárat megjelenését különböző paraméterkombinációkkal szimulálták, az eredményt pedig megmutatták Chrisnek és Paul-nak, akik ezek közül kiválasztották a legmegfelelőbbet.

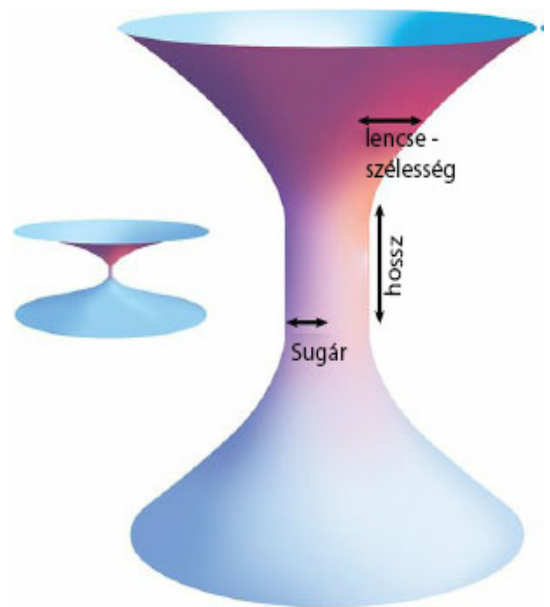
A féregjárat alakját három paraméter segítségével határoztam meg (15.1. ábra).

Az első a féregjáratnak a befoglaló tér ultraokos mérnöke által mérhető *sugara* (a Gargantua sugarának megfelelője). Ha ezt a sugarat megszorozzuk a $2\pi = 6,28318\dots$ értékkel, akkor a féreglyuk területét kapjuk, amelyet Cooper meghatározott, amikor az *Endurance*-szel körülötte keringett, majd áthaladt rajta.

Chris a sugarat még a munka megkezdése előtt megválasztotta. Azt akarta, hogy a féregjáratnak a háttérscillagokra gyakorolt gravitációs-lencse-hatása a NASA akkor rendelkezésre álló legnagyobb távcsöveivel még éppen észrevehető legyen. Emiatt a sugár nagyjából egy kilométer lehetett csupán.

A második paraméter a féregjárat Cooper és a hipertéri mérnök által is ugyanolyan jól mérhető *hossza*.

A harmadik azt szabja meg, hogy a féregjárat mennyire torzítja el a mögötte elhelyezkedő objektumok fényét. A lencsézés részleteit a féregjárat szájához közeli tér alakja határozza meg. Ezt az alakot olyannak választottam, hogy hasonlítson egy nem forgó fekete lyuk eseményhorizontján kívüli alakhoz. Ennek csak egyetlen változtatható paramétere van: az erős lencsézést előállító régió szélessége. Ez a paraméter a *lencseszélesség*⁴⁵, jelentése a 15.1. ábráról olvasható le.



15.1. ábra.

A féregjárat a befoglaló térből nézve az alakját meghatározó három paraméter. A kis képen ugyanaz a féregjárat van, csak a befoglaló tér messzebből nézve, hogy a külső részeit is láthassuk.

⁴⁵ A legerősebb lencsézés ott jelentkezik, ahol a féregjárat alakja a befoglaló térben legjobban görbül. Ez az a régió, ahol kifelé haladva a meredeksége 45 foknál még nagyobb, így a lencseszélesség a féregjárat torkától a befoglaló térben mért azon sugár, ahol a meredekség éppen 45 fok (15.1. ábra)

Hogyan befolyásolják a paraméterek a féregjárat megjelenését?

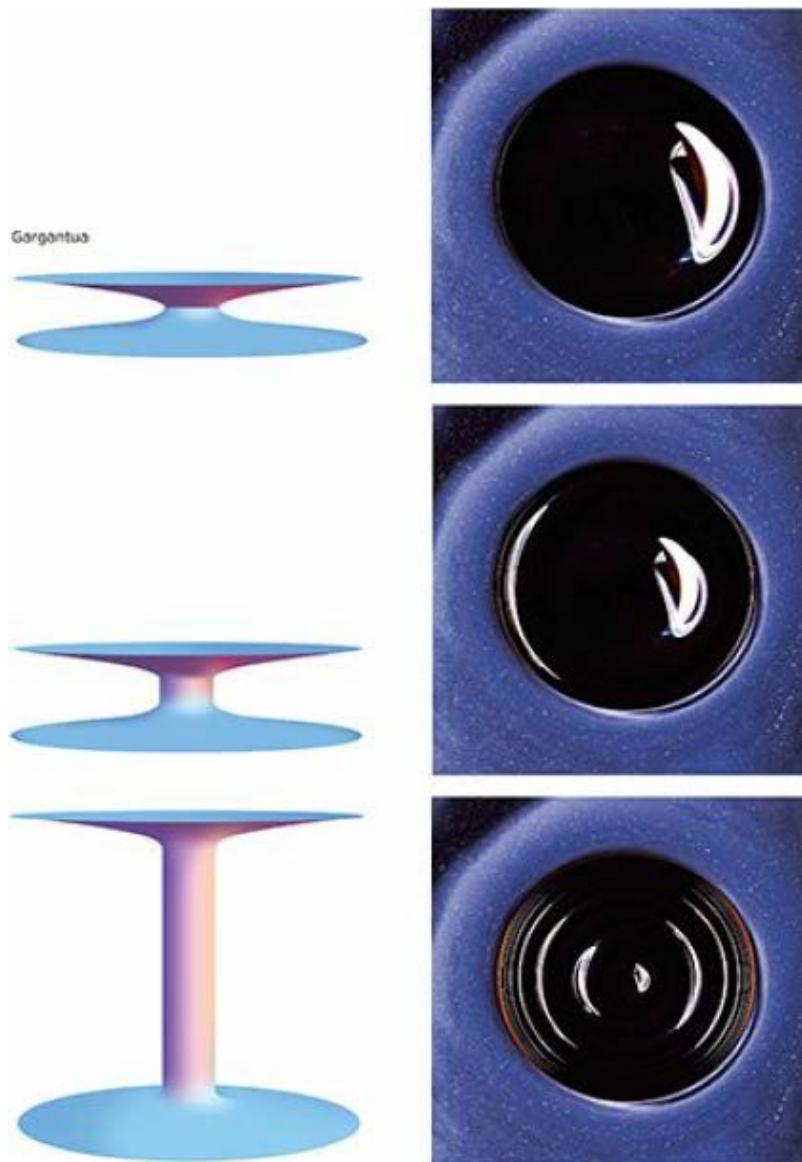
Ahogyan azt a Gargantua esetében (8. fejezet) is tettem, Einstein relativisztikus törvényeit használtam a féregjárat körül és az abban mozgó fény pályáját leíró egyenletek származtatására, és kidolgoztam egy eljárást, amellyel az egyenleteimből kiszámítható a féregjárat gravitációs lencsézése, ennek folyamányaként pedig az, hogy mit lát a körülötte keringő vagy a rajta átrepülő kamera. Miután ellenőriztem, hogy az egyenleteim és az eljárásom a várt képeket szolgáltatják, elküldtem azokat Olivernek, aki megírta a filmhez szükséges IMAX minőségű képeket előállító számítógépes kódot. Eugénie von Tunzelmann hozzáadta a háttércsillagokat és azokat az objektumokat, amelyeket a féregjárat majd leképez, majd ő, Oliver és Paul elkezdtek feltérképezni a paramétereim hatását. Tőlük függetlenül ugyanezt tettem én is.

Eugénie szívességből a könyv számára előállította a 15.2. és 15.4. ábrán látható képeket, amelyeken a Szaturnuszt látjuk a féregjáraton keresztül. (Az ő képeinek felbontása messze jobb, mint amit az én kezdetleges számítógépes kódom tud produkálni.)

A féregjárat hossza

A paraméterek hatásának feltérképezését kezdjük a hosszal, mégpedig egy olyan féregjáratéval, amelynek a lencseszélessége kicsi (lásd 13.2. ábra).

Ha a féregjárat rövid (felső kép), a kamera a féreglyukon keresztül látja a Szaturnusz eltorzított, elsőrendű képét, amely kitölti a féregjárat kristálygömbszerű szájának jobb oldali felét. Van egy nagyon vékony másodrendű, lencse formájú kép is a kristálygömb bal szélén. (A jobb alsó részen látható hasonló struktúra nem a Szaturnuszé, hanem a külső univerzum egy részének eltorzított képe.)



15.2. ábra.

Balra: Egy kicsi, a sugarának mindössze 5 százalékával egyenlő lencseszélességű féregjárat a befoglaló térből nézve. Jobbra: Amit a kamera lát. Fentről lefelé: Növekvő féregjárat-hosszúság: a féregjárat sugarának 0,01-, 1- és 10-szerese (Eugenie von Tunzelmann csapatának szimulációja, Oliver James egyenleteimen alapuló számítógépes kódjának felhasználásával)

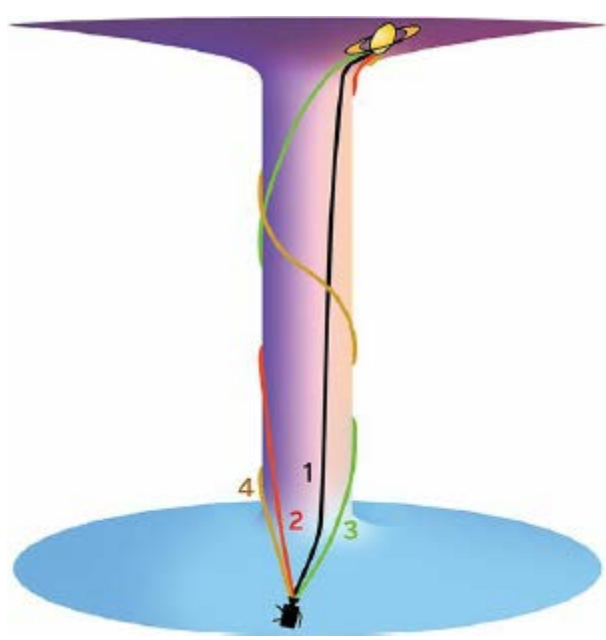
Amint a féregjárat hossza növekszik (középső kép), az elsőrendű kép összehúzódik, és befelé mozdul el, ugyanígy a másodrendű kép is, a kristálygömb jobb oldali szélén pedig egy nagyon vékony, lencseszerű harmadrendű kép is megjelenik.

A további hossznöveléssel (alsó kép) az elsőrendű kép is továbbhúzódik össze, minden kép befelé mozdul, a kristálygömb bal oldali szélén megjelenik egy negyedrendű kép, a jobb oldali szélén egy ötödrendű és így tovább.

A képek kialakulásának magyarázatához rajzoljuk fel a fénysugarakat a féregjáratra, ahogyan azt a befoglaló térből láthatnánk. (15.3. ábra). Az elsőrendű képet a Szaturnusztól a

kameráig a lehetséges legrövidebb úton eljutó fekete fénysugár (1) és az azt szorosan körbefogó fénynyaláb állítja elő. A másodrendű képet a vörös fénysugarat (2) tartalmazó nyaláb, amely a feketéhez képest ellentétes irányban jut át a féregjáraton. Ez a vörös sugár a legrövidebb, az óramutató járásával ellentétes forgású úton jut el a Szaturnusztól a kameráig.

A harmadrendű képet a zöld sugár (3) nyalábja állítja elő, amelyik a lehetséges legrövidebb, az óramutató járásával megegyező, de a féregjáratot legalább egyszer teljesen körbefogó pályán halad. A negyedrendű képet a barna sugár (4) nyalábja hordozza, ez a lehető legrövidebb, az óramutató járásával ellentétes, a féregjáratot legalább egyszer teljesen körbefutó pályán halad.



15.3. ábra.

A Szaturnuszról induló, a kamerához a féregjáraton keresztül jutó fénysugarak

Meg tudjuk-e magyarázni az ötöd- és hatodrendű képeket, azt, hogy miért húzódnak össze azok, ahogyan nő a féregjárat hossza, és hogy a

képek miért a féregjárat kristálygömb-szájának szélén tűnnek fel, majd mozognak onnan befelé.

A féregjárat lencseszélessége

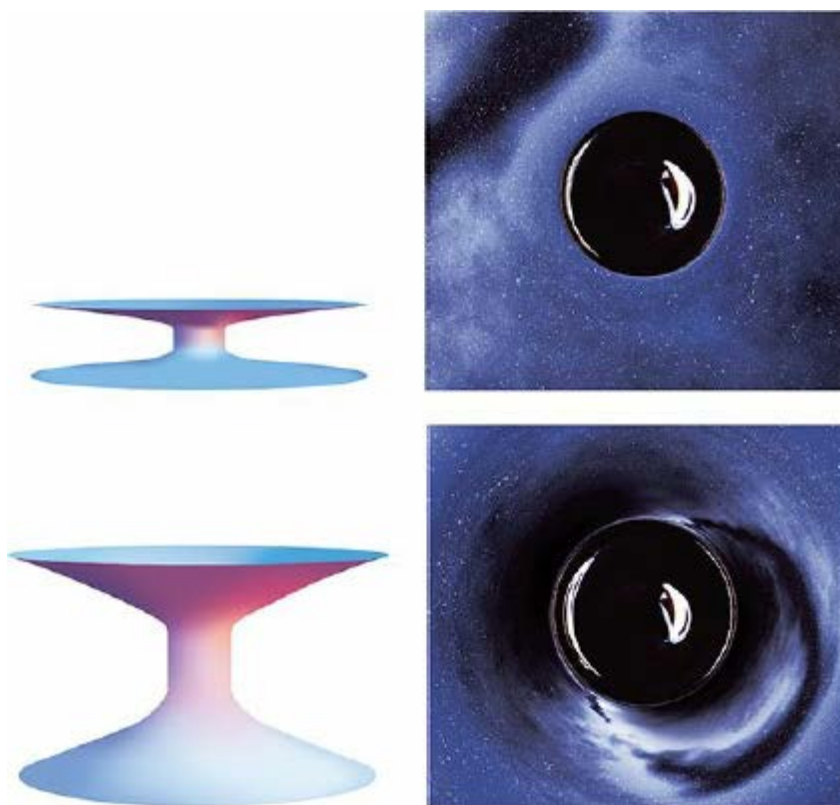
Miután láttuk, hogy a féregjárat hossza befolyásolja, hogy mit lát a kamera, rögzítettük azt, mégpedig viszonylag rövid a féregjárat sugarával megegyező értéken, és a lencseszélességet változtattuk. Közel nulláról a féreglyuk átmérőjéig növeltük, miközben folyamatosan számoltuk a kamera által látható

képeket. A 15.4. ábra a két szélsőértéknél kapott eredményt mutatja.

Nagyon kicsi lencseszélesség esetén (bal oldalon fent) éles átmenet van a külső univerzum (vízszintes fedőlapok) és a féregjárat torka (függőleges henger) között. Amint a kamera által érzékelt képen (jobb oldalon fent) látható, a féreglyuk a csillagmezőt és a sötét ködöt a bal felső sarokban csak kissé torzítja el a széléhez közel. Egyébként csak simán kitakarja a csillagmezőt, ahogyan azt bármilyen nem átlátszó, gyenge gravitációjú test, például egy bolygó vagy egy űreszköz tenné.

A 15.4. ábra alsó részén a lencseszélesség a féreglyuk átmérőjének körülbelül fele, így az átmenet a torok (függőleges henger) és a külső univerzum (aszimptotikusan vízszintes fedőlapok) között viszonylag sima.

Ilyen nagy lencseszélességgel a féregjárat többszörös képeket létrehozva erősen eltorzítja a csillagmezőt és a sötét ködöt (15.4. ábra jobb alsó része), majdnem ugyanúgy, mint a nem forgó fekete lyuk teszi (8.3. és 8.4. ábrák). A lencsézés ráadásul felnagyítja a Szaturnusz másod- és harmadrendű képeit. A 15.4. ábra alsó részén a féregjárat nagyobbak tűnik, mint felül. A



15.4. ábra.

A csillagmezőről és a Szaturnuszról a féreglyuk gravitációs lencsézése által előállított képek: a lencseszélesség a felsőn a féregjárat sugarának 0.014-szerese, míg az alsón 0.43-szorosa (Eugenie von Tunzelmann csapatának szimulációja, Oliver James egyenleteimen alapuló számítógépes kódjának felhasználásával)

kamera nagyobb szögben mutatja. Ennek oka nem az, hogy a kamera közelebb van a szájhoz: nincs közelebb. A távolsága mindkét kép esetén ugyanakkora. A növekedés teljes egészében a gravitációlencse-hatás következménye.

A Csillagok között féregjárata

Amikor Chris szembesült a különböző hosszúsággal és lencseszélességgel kiszámított lehetőségekkel, választása egyértelmű és határozott volt. A közepes és nagy féregjáratokon átnézve látható többszörös képek megzavarhatták volna a közönséget, így a Csillagok között féregjáratának hosszát nagyon kicsire, sugarának mindössze 1 százalékára választta.

Hasonlóan tett a lencseszélességgel is, amit a sugár kb. 5 százaléknak választott, hogy az általa okozott lencsézés észrevehető és érdekes legyen, de sokkal kisebb, mint a Gargantua esetében.

A féregjárat így a 15.2. ábra felső részén látható típusú lett. A *Csillagok között*-ben, miután a Double Negative csapata az ellentétes oldalára gyönyörű ködöket, porsávokat és csillagmezőket tartalmazó galaxist varázsolt, csodálatos látványt nyújt (15.5. ábra). Számomra ez a film legfelemelőbb pillanata.

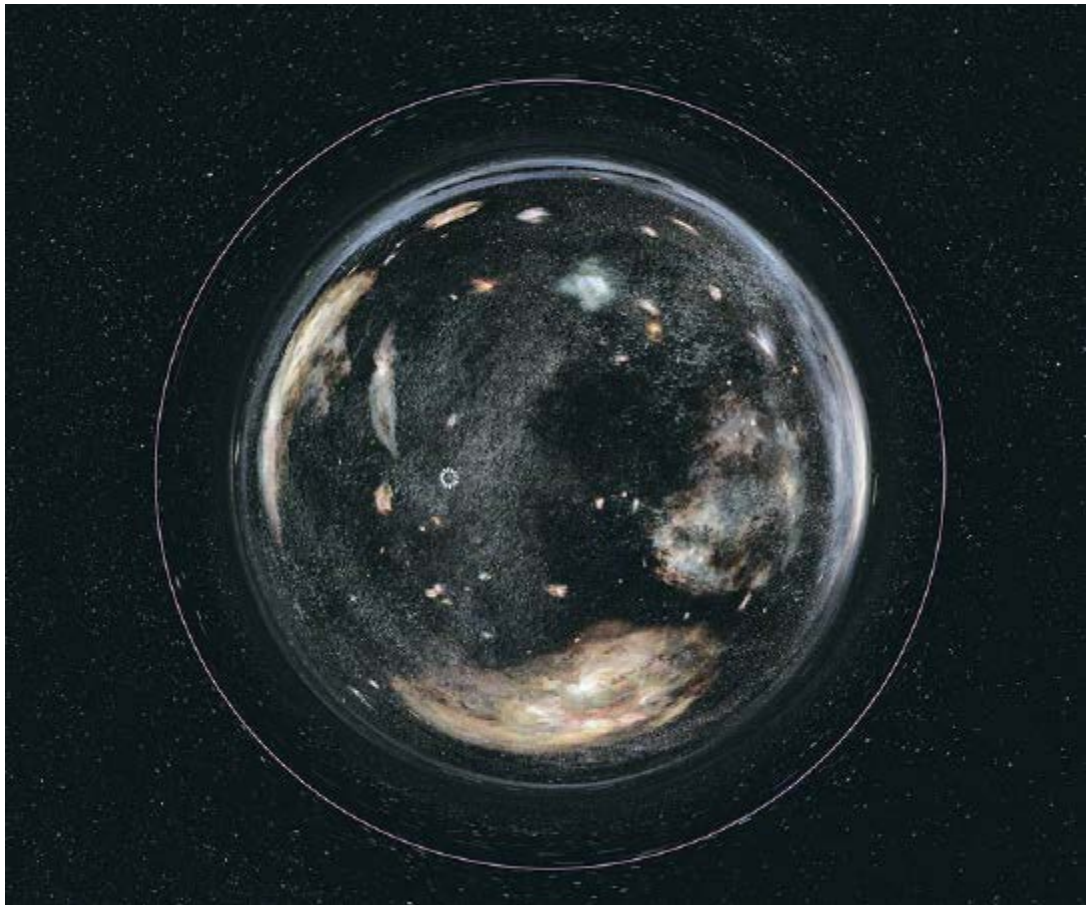
Utazás a féregjáraton keresztül

2014. április 14-én sürgős telethonhívást kaptam. Chris volt, akinek gondjai akadtak az *Endurance* féregjáraton történő áthaladásának megjelenítésével, és a tanácsomat akarta kérni. Átautóztam hozzá a Syncopy főhadiszállására, ahol a film utómunkái folytak, és Chris megmutatta, mi a probléma.

Az egyenleteim alapján Paul csapata különböző hosszak és lencseszélességek mellett jelenítene meg a féregjáraton keresztül történő utazást. Röviden: a választott kis lencseszélességgel az áthaladás gyors volt, unalmas és érdektelen. Hosszabb féregjárat esetén úgy tűnt, mintha egy hosszú alagút villódzó falai között suhannánk, illet meg láttunk már korábbi filmekben is. Chris számos „színes, szagos” változatot mutatott, és egyet kellett értenem vele, hogy egyikben sincs olyan meggyőző újdonság, amilyenre vágyott. Bár aludtam rá egyet, most nem jutott eszembe semmi üdvöztető.

Másnap Chris Londonba repült, hogy Paul Double Negative-os csapatával megoldást keressenek a problémára. Végül arra jutottak, hogy nem használják az egyenleteimet, és - Paul szavaival - „a féregjárat belsejét absztraktabb módon értelmezik”, amely értelmezés az egyenleteimet használó szimulációkon alapul ugyan, de jelentősen változtat azokon a művészi szabadság érdekében.

Amikor a *Csillagok közöli* egyik tesztvetítésén megnézhettem a féregjáraton való áthaladást, nagyon tetszett. Bár nem teljesen pontosból visszaadja, hogy mit láthatnánk, érezhetnénk egy valódi féregjáraton keresztül utazva, ugyanakkor újszerű és lenyűgöző.



15.5. ábra.

A féregjárat a Csillagok között előzetesében. Az Endurance a féreglyuk előtt látható, a centrumhoz közel. A féregjárat köré rózsaszínnel egy Einstein-gyűrűt rajzoltam, mint a 8.4. ábrán a nem forgó fekete lyuk köré. A gravitációsan lencsézett (A Csillagok között-ből, a Warner Bros Entertainment engedélyével)

Önök is így gondolják?

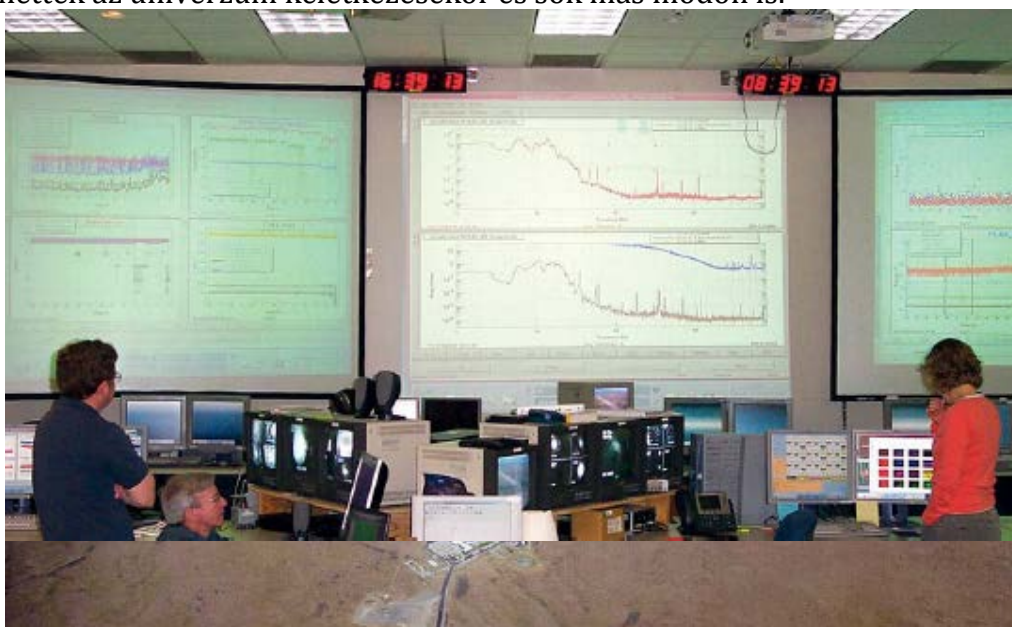
16. A féregjáratok felfedezése: gravitációs hullámok



Hogyan fedezhette fel a *Csillagok között* emberisége a féregjáratot? Fizikusként van tippem rá. A következőkben ezt írom le a *Csillagok között* történetének kiterjesztéseként - amely természetesen csak az én elképzelésem, Christopher Nolannek nincs hozzá köze.

A LIGO gravitációs hullámok kitörését detektálja

Úgy képzem, hogy évtizedekkel a film történetének kezdete előtt a még húszas éveiben járó Brand professzor a LIGO (The Laser Interferometer Gravitational Observatory) projekt (16.1. ábra) igazgatóhelyettese volt. A LIGO a távoli univerzumból a Földhöz érkező térfodrozódások után kutatott. Ezek a fodrozódások, az ún. gravitációs hullámok például akkor keletkezhetnek, amikor két fekete lyuk összeütközik, egy fekete lyuk széttép egy neutroncsillagot, de gerjesztődhetnek az univerzum keletkezésekor és sok más módon is.



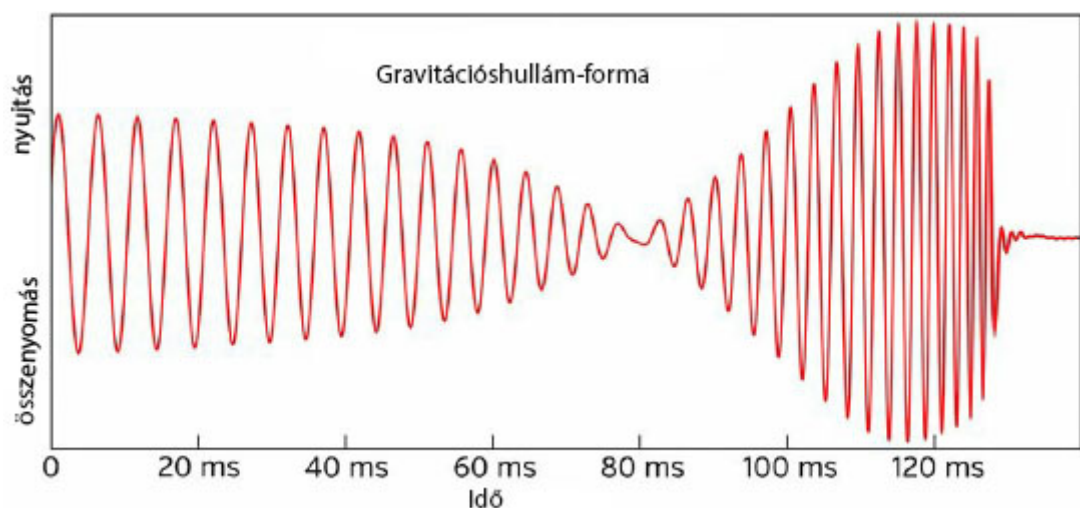
16.1. ábra

Fent: Légi felvétel a Washington állambeli Hanfordban található LIGO gravitációshullám-detektorról.

Lent: A LIGO vezérlőterme, ahonnan a detektort irányítják és a jeleket monitorozzák

2019-ben egy napon a LIGO-t gravitációs hullámok addig soha nem látott erősségű csomagja érte el (16.2. ábra). A hullámozás amplitúdója néhány alkalommal megnőtt és lecsökkent, majd a hullámok hirtelen elenyésztek. A kitörés mindössze néhány másodpercig tartott.

A hullámok alakját („hullámforma”, 16.2. ábra) szuperszámítógépes szimulációkkal összehasonlítva Brand professzor és munkatársai következtettek a forrásukra is.



16.2 ábra.

A LIGO által felfedezett gravitációshullám-forma utolsó 120 milliszekundumos [ms] része

Fekete lyuk körül keringő neutroncsillag

A hullámokat egy fekete lyuk körül keringő neutroncsillag bocsátotta ki. A neutroncsillag tömege a Napénak 1,5-szerese, a gyorsan forgó fekete lyuké pedig 4,5-szerese. A forgás a teret is mozgásba hozta, a térörvény pedig magával ragadta a csillag pályáját, lassú precesszióra

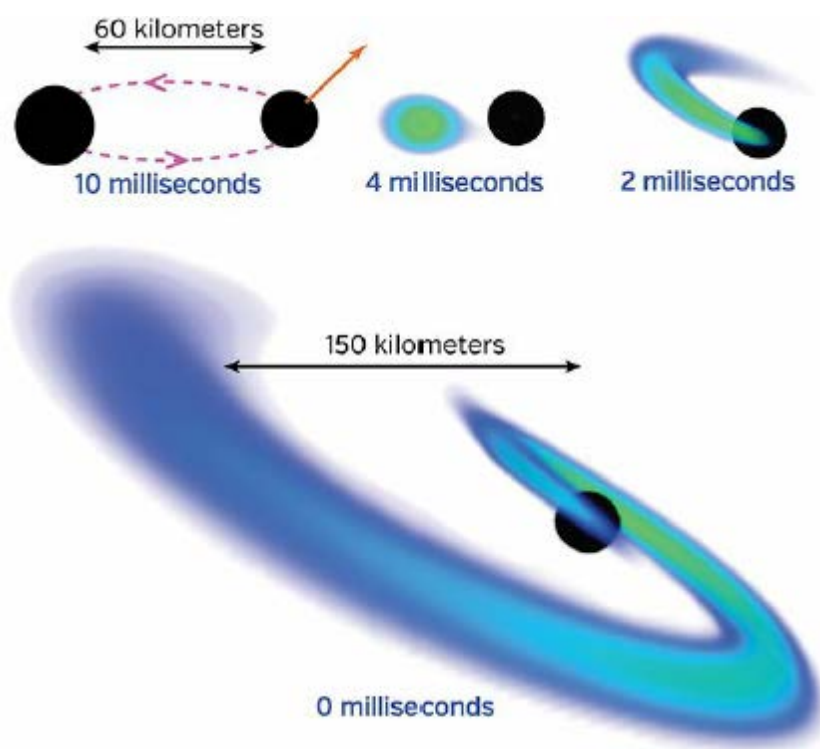


16.3. ábra.

A fekete lyuk körül keringő csillag által kibocsátott gravitációs hullámok a befoglaló térből nézve.

kényszerítve azt, hasonlóan egy bűgőcsiga imbolygó mozgásához. A precesszió modulálta a hullámok amplitúdóját, folyamatosan növelve és csökkentve azt (16.2. ábra). A hullámok átszelték az univerzumot elszállítva az energiát (16.3. ábra). Csökkenő energiája miatt a csillag

spirális pályán folyamatosan a fekete lyuk felé mozgott. Amikor a távolság a két objektum között 30 kilométerre csökkent, a fekete lyuk árapályereje elkezdte szétszaggatni a csillagot. A törmelék 97 százalékát elnyelte a lyuk. 3 százalék pedig kidobódon, létrehozva egy forró gázból álló csóvát, amelyet a fekete lyuk ismét befelé szippantott, és így egy akkréciós korong alakult ki belőle.



16.4. ábra

A neutroncsillag élete utolsó néhány ezred másodpercének számítógépes szimulációja (Francois Focart és kollégáinak szimulációjából lásd: <http://www.black-holes.org>)

A 16.4. ábra a csillag élete utolsó néhány milliszekundumának számítógépes szimulációját mutatja. A vég előtt tízezred másodperccel a fekete lyuk a vörös nyíl által jelzett tengely körül forog, a csillag pályájának tengelye pedig a kép függőleges iránya. Négy milliszekundumnál a fekete lyuk tendex-vonalai szétszaggatják a csillagot. Két ezred másodpercnél a lyuk örvénylő tere az egyenlítői síkjába tereli a csillag törmelékét, nulla milliszekundumnál pedig elkezdi kialakulni a tömegbefogási korong.

A féregjárat felfedezése

A megelőző két év LIGO-adatait áttekintve Brand professzor és csoportja a neutroncsillag által kibocsátott nagyon gyenge hullámokat fedezett fel. A csillagon lehetett egy kicsiny „hegy”,

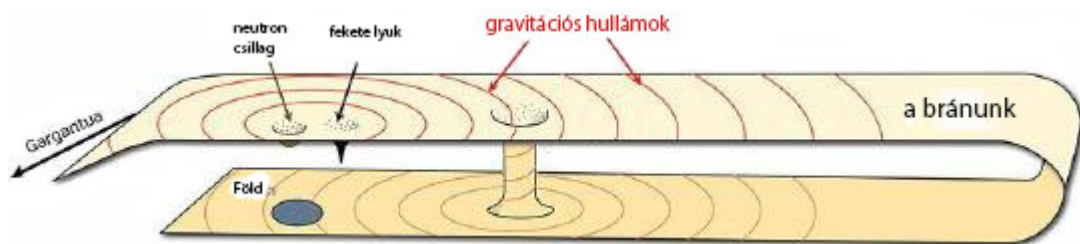
mindössze egy centiméter magas⁴⁶ és néhány kilométer széles (ilyenek létezését valószínűnek gondolják). Amint a hegy a csillag forgása miatt körbe-körbe járt, napról napra gyenge, de állandó hullámokat keltett,

A hullámok alapos elemzésével Brand professzornak sikerült meghatároznia a forrásuk irányát. Az eredmény azonban egyszerűen hihetetlen volt! A hullámok a Szaturnusz körül keringő valamiről érkeztek. A forrás mindvégig a Szaturnusz közelében maradt, amint az és a Föld Nap körüli keringésük következtében egymáshoz képest elmozdultak.

Egy Szaturnusz körül keringő neutroncsillag? Lehetetlen! Egy neutroncsillag által kísért fekete lyuk, amelyik a Szaturnusz körül kering? Meg inkább lehetetlen! A Szaturnusz már régen elpusztult volna, és a fekete lyuk - neutroncsillag páros gravitációja réges-rég szétzilálta volna a Nap minden bolygójának, köztük a Földnek is a pályáját. Ennek következtében bolygónk vagy túlságosan közel, vagy túl távol került volna a Naptól. Vagy megégünk, vagy megsülünk.

De a hullámokat észlelték, és azok egyértelműen a Szaturnusz közeléből indultak.

Brand professzor csak egyetlen lehetséges magyarázatot tudott elképzelni: A hullámok egy Szaturnusz körül keringő féregjáratból jönnek, a forrásuknak, egy fekete lyuk és egy neutroncsillag párosának pedig a féregjárat túloldalán kell lennie (16.5. ábra). A kettős által kibocsátott hullámok egy kis részét befogta a féregjárat, és azon átjutva terjedtek szét a Naprendszerben. Egy részük elérte a Földet, és jelet eredményezett a LIGO gravitációshullám-detektoraiban.



16.5. ábra

A gravitációs hullámok a féregjáraton keresztül jutnak el a Földre.

A történet születése

A fenti történet rövid változata már benne volt a *Csillagok között* eredeti vázlatában, amelyet Lyndával közösen írtunk 2006-ban. A gravitációs hullámok azonban nem játszottak jelentős

⁴⁶ A neutroncsillagok kicsiny mérete és rendkívül gyors forgása miatt felszíni irregularitások nem lehetnek igazán nagyok, mert különben a hatalmas centrifugális erők miatt a csillag szilárd kérge szétszakadna. *(A fordító megjegyzése)*

szerepet vázlatunk további részeiben, sőt Jonathan Nolan későbbi forgatókönyvében és annak Chris által átírt változatában sem. A filmben gravitációs hullámok nélkül is hatalmas mennyiségű komoly tudomány szerepelt. Így amikor Chris egyszerűsíteni akarta a *Csillagok között* gazdag tudományos arzenálját, a gravitációs hullámok szinte természetes módon kínálóztak a kihagyásra. Meg is szabadult tőlük.

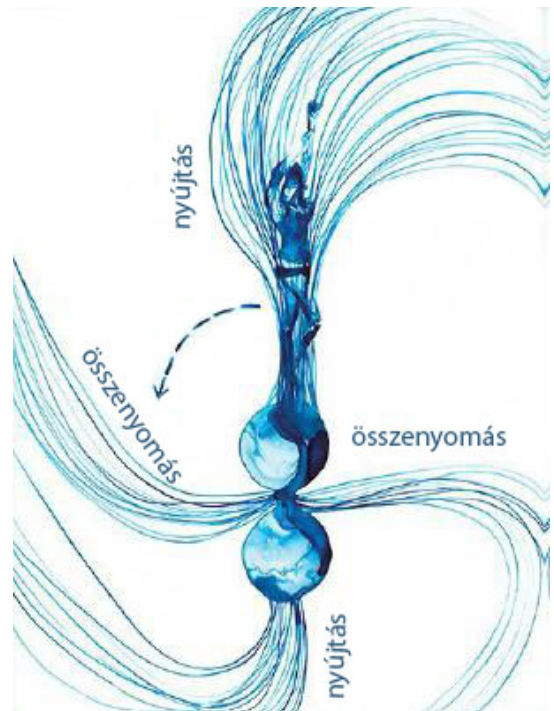
Nekem személyesen persze fájt Chris döntése. 1983-ban Rainer Weiss (MIT) és Ronald Drever (Caltech) társaságában alapítója voltam a LIGO projektnek. Én vázoltam fel a LIGO tudományos alapjait, és két évtizednyi kemény munkám volt abban, hogy valóra váljon. A LIGO ma már üzemszerűen működik, a gravitációs hullámok első detektálását pedig már ebben az évtizedben várjuk.

Chris indokai a gravitációs hullámok kihagyására azonban megalapozottak voltak, így még csak egy halk ellenvetésem sem lehetett.

A gravitációs hullámok és detektoraik

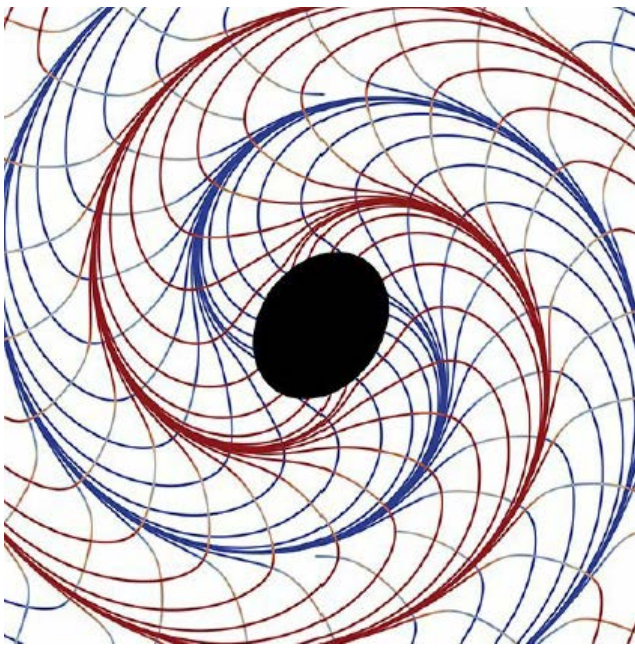
Most a magam kedvéért csak részletezem egy kicsit a gravitációs hullámokat, mielőtt visszatérünk a *Csillagok között*-höz.

A 16.6. ábra egy fantáziarajz az óramutató járásával ellentétesen egymás körül keringő két fekete lyuk tendex-vonalairól. Emlékezzünk arra, hogy a tendex-vonalak árapályerőket generálnak (4. fejezet). A lyukak ellentétes oldalairól induló vonalak megnyújtanak mindent, ami a közelükbe kerül, még a barátnőt is, akit a rajzoló ide helyezett. Az ütköző oldalak közti területtől kiinduló vonalak pedig mindent összenyomnak a környezetükben. Amint a lyukak egymás körül keringenek, magukkal vonszolják a vonalakat, mégpedig úgy, hogy azok kifelé és hátrafelé elgörbülnek, hasonlóan, mint a forgó locsolófejből kiáramló vízszugár.



16.6 ábra

Egymás körül az óramutató járásával ellentétes irányban keringő, majd összeütköző két fekete lyuk tendex-vonalai (Lia Halloran festménye)



16.7. ábra

Egy forgó, deformált fekete lyuk tendex-vonalai (Rob Owen rajza)

A lyukak egyetlen, nagyobb fekete lyukká olvadnak össze, amely torzult (nem gömbszimmetrikus) és az óramutató járásával ellentétesen forog. A tendex-vonalak, szintén a locsolófejből kiáramló vízsugárhoz hasonlóan, kifelé mozognak, és a 16.7. ábrán látható érdekes mintázatot hozzák létre. A vörös vonalak nyújtanak, a kékek összenyomnak.

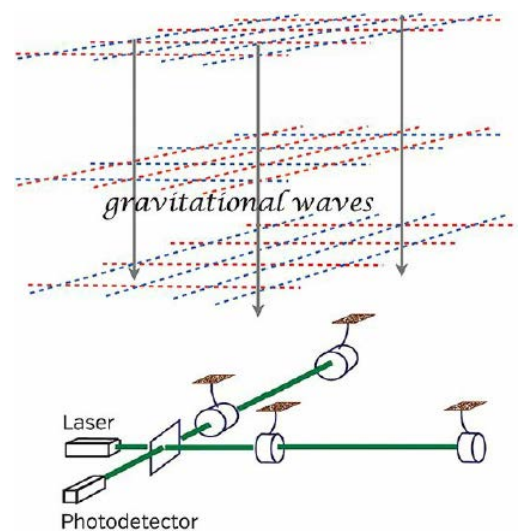
Mindenütt, ahol vastag kék vonalak (erős összenyomás) futnak az ábra síkjában, vastag vörös vonalak (erős nyújtás) indulnak ki a síkból. Fordítva: ahol vastag vörös vonalak vannak az ábrán (nyújtás), kék vonalak (összenyomás) indulnak a harmadik irányban, az ábra síkjából kifelé. Ahogyan a hullámok haladnak kifelé, a lyuk

deformációja fokozatosan csökken, és a hullámok is gyengülnek.

Amikor eléri a Földet, a hullámok formája olyan, amilyent a 16.8. ábra felső részére rajzoltam. Egyik irányban nyújtanak, a másikat összenyomnak. A nyújtás és az összenyomás oszcillál (vörös jobb-balból kék jobb-bal, majd ismét vörös jobb-bal és így tovább), amint a hullámok áthaladnak a 16.8. ábra alsó részén látható detektoron.

A detektor négy hatalmas, 40 kilogramm tömegű és 34 centiméter átmérőjű tükröt tartalmaz, amelyek két merőleges kar végén elhelyezett felfüggesztéseken lógnak. A hullámok tendex-vonalai az egyik kart megnyújtják, míg a másikat összenyomják, majd az elsőt nyomják össze és a másikat nyújtják meg és így tovább. Az interferometriának nevezett eljárásban a tükrök oszcilláló távolságát lézernyalábok mérik. Innen származik a LIGO elnevezés is: Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory.

A LIGO jelenleg nemzetközi együttműködésben üzemel tizenhét ország 900 kutatójának részvételével, központja a Caltechen van. A vezetői David Reitze (igazgató), Albert Lazzarini (igazgatóhelyettes) és Gabriella Gonzalez (szóvivő). Az univerzum jobb megértésének reményében



16.8 ábra.

A LIGO detektorait elérő gravitációs hullámok

az Amerikai Egyesült Államok adófizetőinek pénzéből hozták létre az NSF (National Science Foundation) támogatásával.

A LIGO-nak Hanfordban (Washington állam) és Livingstonban (Louisiana állam) vannak detektorai, de terveznek egy harmadikat is Indiában. Olasz, francia és holland kutatók hasonló interferométert építettek Pisa közelében, japán fizikusok pedig egy hegy gyomrában húzódó alagútban építenek egyet. Ezek a detektorok egy világméretű óriási hálózat tagjaiként összehangoltan fognak dolgozni az univerzum gravitációs hullámok segítségével történő felfedezésén.

A LIGO-ban dolgozó sok kutató a tanítványom volt, az én érdeklődésem azonban 2000-ben más témák felé fordult. De továbbra is izgatottan figyelem, ahogyan a LIGO és nemzetközi partnerei egyre közelebb kerülnek a nagy célhoz, a gravitációs hullámok első észleléséhez.

Az univerzum görbült oldala

A Csillagok között egy nagy kaland, amelyben az emberek fekete lyukakkal, féregjáratokkal, szingularitásokkal, gravitációs anomáliákkal és magasabb dimenziókkal kerülnek szembe. Ezekben az a közös, hogy mindegyik görbült térből és időből „készült”, vagy közvetlen kapcsolatban áll a görbülettel. Ezért illetem együttesüket „az univerzum görbült oldala”⁴⁷ kifejezéssel.

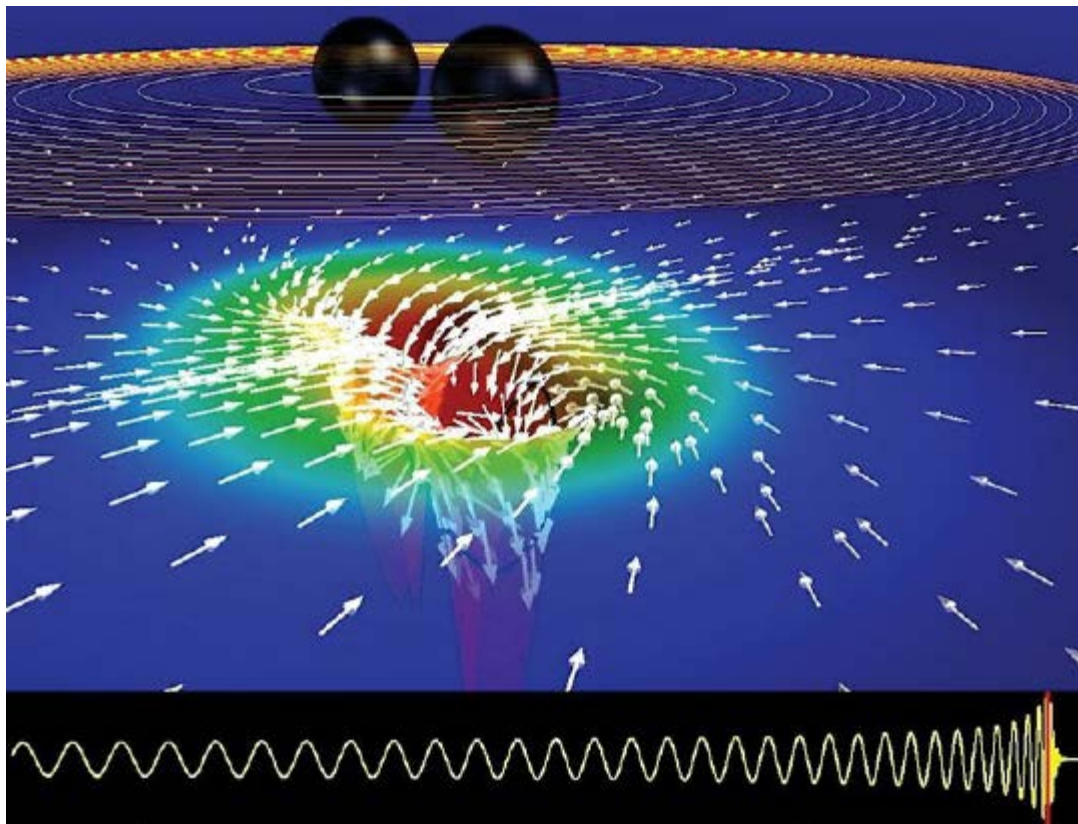
Csak nagyon kevés kísérleti vagy megfigyelési tapasztalattal rendelkezünk az univerzum görbült oldaláról. Ezért olyan fontos a gravitációs hullámok: mivel görbült térből állnak, ideális eszköze a görbült oldal feltérképezésének.

Tegyük fel, hogy az óceánt csak nyugodt időben láttuk, és így nem tudunk semmit a hánykolódó víztükrőről és a nagy viharok által felkorbácsolt hatalmas óceáni hullámokról.

Hasonló a helyzet a görbült térre és időre vonatkozó mai ismereteink esetében is. Keveset tudunk csak arról, hogyan viselkedik a görbült tér és a görbült idő egy „viharban” - amikor a tér alakja és az idő múlásának üteme vadul hullámzik. Számomra ez a tudás elbűvölő határa. A kitűnő névkiagyaló, John Wheeler, akivel már találkoztunk a korábbi fejezetekben, a „geometrodinamika” elnevezést találta ki rá: a tér és az idő geometriájának vad dinamikai viselkedése.

⁴⁷ A rész eredeti címe - The Warped Side of the Universe - valószínűleg a Pink Floyd együttes 1973-ban megjelent híres lemeze, a The Dark Side of the Moon címének parafrázisa. *(A fordító megjegyzése)*

Az 1960-as évek elején, amikor Wheeler hallgatója voltam, arra buzdított bennünket, hogy saját kutatásainkban foglalkozzunk a geometrodinamika felfedezésével. Megpróbáltuk, de csúfos kudarcot vallottunk. Az Einstein-egyenleteket nem tudtuk elég jól megoldani ahhoz, hogy az előrejelzéseiket megértsük, és nem volt módszerünk arra sem, hogy a geometrodinamika hatásait észleljük a fizikai univerzumban.



16.9. ábra.

Két fekete lyuk összeütközésének pillanatát mutató szimuláció. Fent: A lyukak pályái és árnyékai az univerzumunkból nézve. Középen: A lyukak görbült tere és ideje a befoglaló térből nézve. A nyilak jelzik a térorvénylést, a színek pedig az időgörbületet. Lent: A kibocsátott gravitációs hullám alakja. A szimulációban egyforma, nem forgó fekete lyukak szerepelnek.

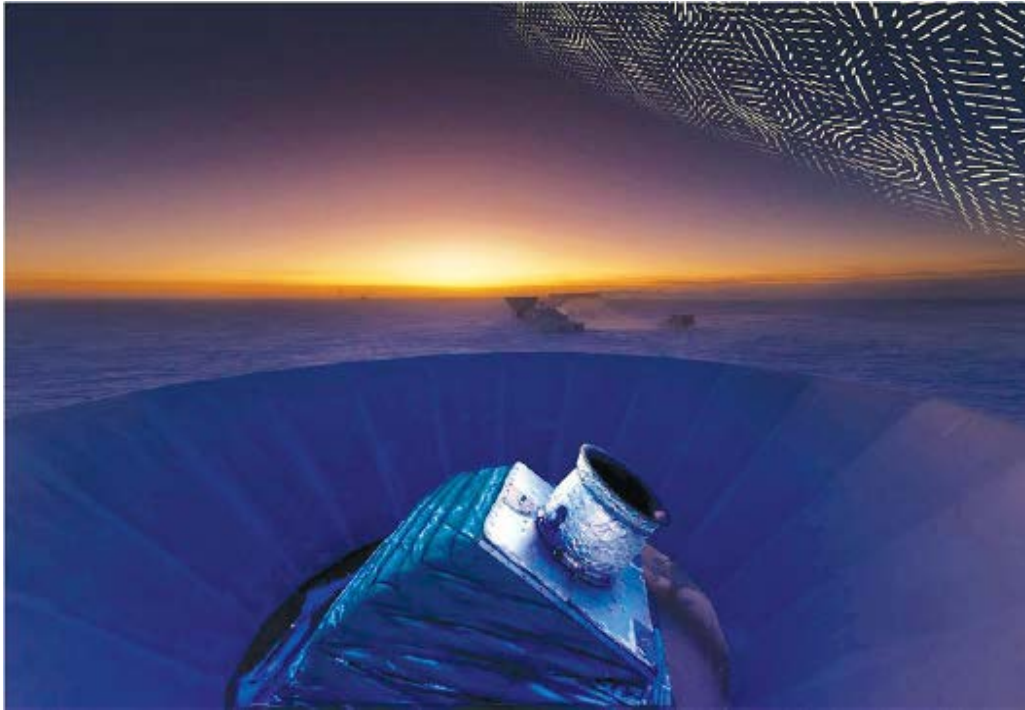
Pályafutásom jelentős részét annak szenteltem, hogy ezen változtassak. Társalapítója voltam a LIGO-nak, amelyet azzal a céllal hoztunk létre, hogy a távoli univerzumban megfigyelhessük a geometrodinamikát. 2000-ben, amikor a LIGO-val kapcsolatos feladataimat átadtam másoknak, alapítottam egy kutatócsoportot a Caltechen, hogy szuperszámítógépeken szimuláljuk a geometrodinamikát, numerikusan megoldva az Einstein-féle relativisztikus egyenleteket. A projekt neve SXS: Simulating eXtreme Spacetimes, és együttműködik Saul Teukolsky kutatócsoportjával a Cornell Egyetemen, de másokkal is.

A geometrodinamika egyik remek alkalmazása két fekete lyuk ütközésének tanulmányozása. Amikor összeolvadnak, heves forgásba hozzák a teret és az időt. SXS-szimulációink már elég fejlettek ahhoz, hogy elkezdhessük a relativitáselmélet előrejelzéseinek feltárását (16.9. ábra).

A LIGO és társai néhány éven belül detektálni fogják a fekete lyukak ütközése által generált gravitációs hullámokat, és így tesztelhetjük szimulációink előrejelzéseit. Csodálatos korszaka ez a geometrodinamika vizsgálatának!

Az ősrobbanás gravitációs hullámai

1975-ben orosz barátom, Leonyid Griscsuk ijesztő jóslattal állt elő: az ősrobbanás során egy



16.10 ábra

A Jamie Bock és munkatársai által épített Bicep2 műszer, amellyel felfedezték az ősi gravitációs hullámok nyomát. A Déli-sarkon működő Bicep2 itt szűrőlevegőben látható, ami évente csak kétszer fordul elő a Déli-sarkon. A műszert egy pajzs védi a környező jégmezők sugárzásától. A jobb felső sarokban látható kis kép a mikrohullámú háttérsugárzás polarizációjában talált mintázatot mutatja. A háttérsugárzás elektromos terének erővonalai a rövid szaggatott vonalak mentén húzódnak

korábban ismeretlen mechanizmus következtében gravitációs hullámok özöne keletkezett. Szerinte a gravitáció ősrobbanáskori kvantumfluktuációit hatalmas mértékben felerősítette az univerzum kezdeti tágulása, és így azok ősi gravitációs hullámokká alakultak. Ha felfedeznénk ezeket a gravitációs hullámokat, bepillantást nyerhetnénk univerzumunk születési folyamatába.

A következő években, ahogyan tudásunk az ősrobbanásról egyre nőtt, világossá vált, hogy a keresett hullámok a belátható világegyetem méretével összemérhető tartományban, azaz milliárd fényéves hullámhosszakon lennének a legerősebbek, és valószínűleg jóval gyengébbek az összehasonlíthatatlanul kisebb, mindössze néhány száz vagy ezer kilométeres hullámhosszakon, amelyekre a LIGO detektorai érzékenyek.

Az 1990-es évek elején több kozmológus is felismerte, hogy a milliárd fényév hullámhosszúságú gravitációs hullámoknak egyedi nyomot kell hagyniuk az univerzumot kitöltő elektromágneses mezőn, az ún. kozmikus mikrohullámú háttérsugárzáson (CMB - cosmic microwave background). Innentől ez lett a Szent Grál: a CMB-lenymat keresése, amelyből következtetni tudunk a lenymatot létrehozó ősi gravitációs hullámok tulajdonságaira, ezen keresztül pedig megvizsgálhatjuk az univerzum születését.

2014 márciusában, éppen a könyv írása közben, Jamie Bock, a Caltech kozmológusa - egy folyosón van az irodánk - által összefogott csoport felfedezte a CMB-lenymatot. (16.10 ábra)⁴⁸

Fantasztikus felfedezés, de nem árt az óvatosság: a Jamie és kutatócsoportja által talált mintázatot a gravitációs hullámokon kívül más is okozhatta. A könyv, nyomdába adásakor is intenzív munka zajlik a kérdés eldöntése érdekében⁴⁹.

Már a mintázat valóban az ősrobbanáskor keletkezett gravitációs hullámoknak köszönhető, akkor ez olyan kozmológiai felfedezés, amilyenből ötven évente egy van. Segítségével bepillantást nyerhetünk az univerzum születése után 10^{-36} másodperccel fennálló állapotokba. Megerősíti azt az elmélet) előrejelzést, hogy a legkorábbi pillanatokban az univerzum tágulása hihetetlenül gyors volt, a kozmológia) zsargonban ez az „infláció” (felfúvódás) időszaka. A kozmológia teljesen új korszakának kezdetét jelzi.

Miután áldoztam a gravitációs hullámokkal kapcsolatos szenvedélyemnek, és bemutattam, hogyan használhatták azokat a *Csillagok között* féregjáratának felfedezésére - valamint megvizsgáltuk a féregjáratok tulajdonságait, különös tekintettel a filmben szereplőre-, utazásra invitálok a kedves olvasót a féregjárat túlsó oldalára. Bemutatom Miller bolygóját, Mann bolygóját és az *Endurance*-t, ami Coopert odavitte.

⁴⁸ A felfedező csoport formális vezetői Jamie, korábbi posztdoktori ösztöndíjasa, John Kovac (jelenleg a Harvardon dolgozik), Chao-Lin Kuo (most a Stanford munkatársa) és Clem Pryke (University of Minnesota) voltak.

⁴⁹ Elsősorban a Planck-űrszonda időközben nyilvánosságra hozott eredményei alapján nagyon valószínű, hogy a felfedezett mintázatot a Tejútrendszerben található por okozza, azaz az ősi gravitációs hullámok nyomát tovább kell keresni. (*A fordító megjegyzése*)

V. A GARGANTUA VIDÉKÉNEK FELFEDEZÉSE

17. Miller bolygója



Cooper és csapata elsőként Miller bolygóját látogatta meg. Az égitesttel kapcsolatos legérdekesebb dolgok a szélsőséges módon lelassult idő, az óriási víz hullámok és a hatalmas árapályerők. A három nem független egymástól, végső okuk, hogy a bolygó nagyon közel kering a Gargantuához.

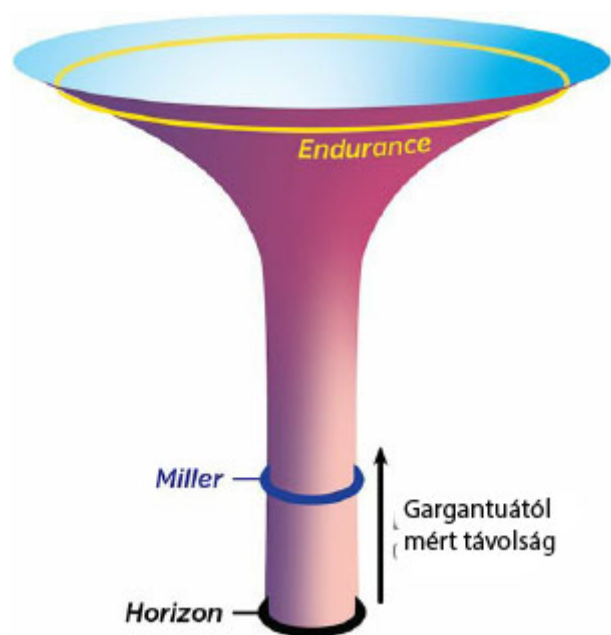
A bolygó pályája

Értelmezésem szerint Miller bolygója a 17.1. ábrán kékkel jelölt helyen van, nagyon közel a Gargantua eseményhorizontjához (lásd 6. és 7. fejezet).

A tér itt úgy görbül, mint egy henger felszíne. Az ábrán a henger keresztmetszetei körök, amelyek kerülete nem változik, ahogyan közeledünk a Gargantuához, vagy távolodunk tőle. Ha visszaállítjuk az elhagyott dimenziót, a keresztmetszetek valójában forgási ellipszoidok lesznek, de ezek kerülete sem változik a Gargantuától mért távolság függvényében.

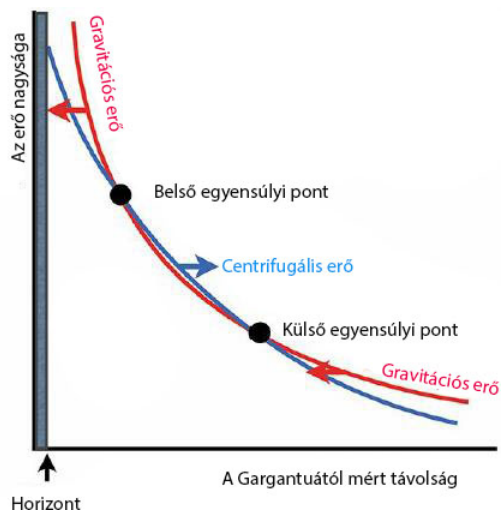
Miben különbözik ez a pozíció a henger bármely más helyétől? Mi teszi olyan különlegessé?

A válasz kulcsa az időgörbületben rejlik, ami nem látszik a 17.1. ábrán. A Gargantua közelében lelassul az idő, annal inkább, minél közelebb vagyunk az eseményhorizontjához. Ezért az időgörbületre vonatkozó Einstein-törvénynek megfelelően (4. fejezet) a gravitáció nagyon erőssé válik, ahogyan közelítünk hozzá. A 17.2. ábrán a gravitáció erősségét jelző vörös görbe meredeken emelkedik. A bolygó által érzékelt centrifugális erő nagyságát mutató kék görbe meredeksége ennél lassabban változik. Ennek eredményeként a két görbe két pontban metszi egymás. Ezekben a pontokban a kifelé mutató centrifugális erő ellensúlyozza a befelé ható gravitációt, így a bolygó keringhet a Gargantua körül.



17.1. ábra

A Gargantua körüli görbült tér a befoglaló térből nézve, egy térdimenziót elhagyva. Az ábra Miller bolygója és a parkolópályá keringő, a csapat visszatérésére várakozó Endurance pályáját is mutatja.



17.2. ábra.

Miller bolygójára ható gravitációs és centrifugális erők.

A belső egyensúlyi pontban a pályája instabil: Ha a bolygó egy picit kifelé mozdul (mondjuk egy közelítő üstökös gravitációs vonzásának hatására), a centrifugális erő győz, és még kijebb tolja a bolygót. Ha befelé mozdul el, a gravitáció lesz a nyertes, és behúzza a bolygót a Gargantuába. Ez azt jelenti, hogy Miller bolygója nem maradhat tartósan a belső egyensúlyi pontban.

A külső egyensúlyi pont azonban stabil: Ha Miller bolygója itt van, és kifelé mozdul, a gravitációs erő nagyobb lesz, és visszahúzza. Ha befelé mozdul ki ebből a helyzetből, a centrifugális erő lesz nagyobb, és tolja vissza a bolygót az egyensúlyi pontba. Az én olvasatomban tehát Miller bolygója itt helyezkedik el.⁵⁰

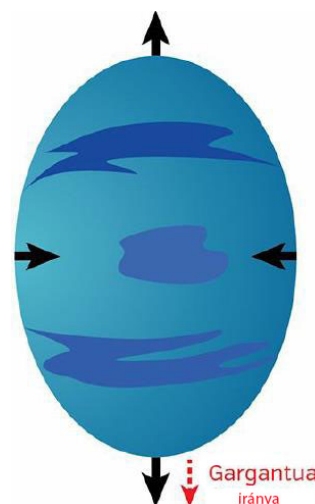
Az időlassulás és az árapályerők

A Gargantua körüli stabil körpályák közül Miller bolygójáé van legközelebb a fekete lyukhoz. Ez azt jelenti, hogy ezt a pályát jellemzi a legnagyobb időlassulás. Hét földi év mindössze egy óra Miller bolygóján. Az idő hatvanezerszer lassabban telik, mint a Földön! Christopher Nolan pontosan ezt akarta.

⁵⁰ A centrifugális erő a bolygó pálya-impulzusnyomatékától függ, ami a keringési sebesség egyfajta mértéke, és állandó a pálya mentén (10. fejezet). Az erők változását a Gargantuától mért távolság függvényében mutató 17.2. ábra megrajzolásakor ezt az impulzusnyomatékot állandó értéken tartottam. Ha egy picit kisebb lenne, mint amekkora Miller bolygója cserében, a centrifugális erő is mindenhol kisebb lenne, és a 17.2. ábra két görbéje nem metszené egymást. Nem létezne egyensúlyi helyzet, és a bolygó a Gargantuába zuhanna. Ezért van a 17.1. és 17.2. ábrán Miller bolygója a Gargantuához lehető legközelebbi stabil pozícióban, ami egyben a legnagyobb időlassulást is biztosítja.

A Gargantuához ilyen közel azonban Miller bolygója nézetem szerint óriási árapályerőknek van kitéve, olyan nagyoknak, hogy a Gargantua majdnem szétszakítja (6. fejezet). Majdnem, de mégsem. Valójában csak deformálja a bolygót, azt viszont nagyon (17.3. ábra). A Gargantua irányában és azzal ellentétesen is erősen kidudorodik.

Ha Miller bolygója forogna a Gargantuához képest (azaz nem mindig ugyanazt az oldalát fordítaná feléje), akkor a bolygóhoz képest az árapályerők is körbejárnának. Először kelet-nyugati irányban összepréselődne, észak-déli irányban pedig megnyúlna. Negyed keringés után az összenyomódás lenne észak-déli és a megnyúlás kelet-nyugati. Az összepréselődések és a megnyúlások hatalmasak lennének a bolygó köpenyének (külső szilárd rétegeinek) teherbírásához képest. A köpeny szétporladna, majd a súrlódás felmelegítené és megolvasztaná, az egész bolygót izzó vörössé változtatva.



17.3. ábra

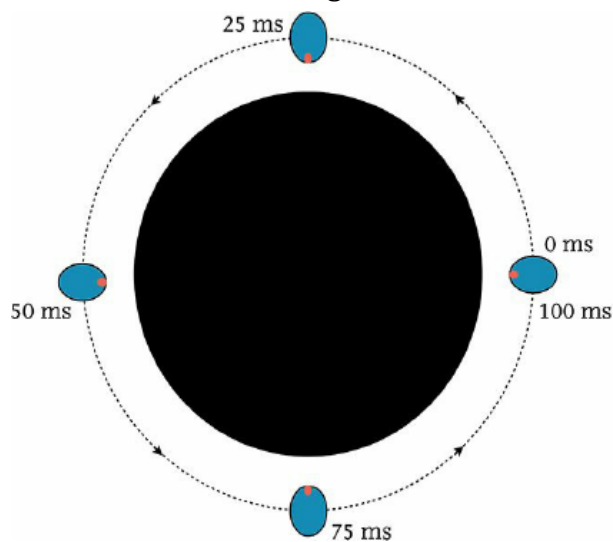
Miller bolygójának árapály-deformációja

Miller bolygója azonban egyáltalában nem így néz ki! A következtetés tehát egyértelmű:

Értelmezésem szerint a bolygónak mindig ugyanazt az oldalát kell a Gargantua felé fordítania (17.4. ábra), vagy ehhez az állapothoz közeli módon kell keringenie (amint ezt később majd még tárgyalom⁵¹).

A térörvény

Einstein törvényei szerint messziről, például Mann bolygójáról nézve Miller bolygója a Gargantua körüli mintegy egy milliárd kilométer kerületű pályáját 1,7 óra alatt futja be. Az ennek megfelelő sebesség körülbelül fele a fényének! Az időlassulás miatt a Ranger legénysége a keringési periódust hatvanezerszer rövidebbnek, csak egy tized másodpercnek



17.4. ábra.

Miller bolygójának keringése és forgása a távoli csillagokhoz képest. A vörös folt a bolygó felszínén és az árapálydudor mindig a Gargantua felé mutatnak

⁵¹ A forgási és keringési periódusok megegyezése, az ún. kötött keringés nem ritka dolog, csillagukhoz nagyon közel keringő exobolygók esetében gyakori, de más dinamikai rendszerekben is jellemző. Ugyanígy kering a Hold is a Föld körül, ezért látjuk mindig ugyanazt az oldalát. (A fordító megjegyzése)

méri. Tíz keringés a Gargantua körül másodpercenként. Ez valóban gyors mozgás! Nem gyorsabb-e, mint a fény? Nem, mégpedig a Gargantua gyors forgása által indukált térörvény miatt. A térnek a bolygó pozíciójánál fellépő örvényléséhez viszonyítva és az ott mérhető időt felhasználva a bolygó a fénynél lassabban mozog, és valójában ez számít. Ebben az értelemben érvényesül az, hogy sebessége a fényénél nem lehet nagyobb.

Értelmezésem szerint, mivel a bolygó mindig ugyanazon oldalát fordítja a Gargantua felé (17.4. ábra), ugyanolyan gyorsan kell forognia, mint ahogyan kering: másodpercenként tíz fordulatot kell megtennie. Hogyan foroghat ilyen gyorsan? A centrifugális erők nem szaggatnák szét? Nem, és a megmentő ismét a tér örvénylése. A bolygó *nem* fog romboló centrifugális erőket érzékelni, ha éppen olyan ütemben forog, mint ahogyan a tér örvénylik, és majdnem pontosan ez történik! Így a forgásnak köszönhető centrifugális erők valójában gyengék. Ellenben, ha nem forogna a távoli csillagokhoz viszonyítva, az örvénylő térhez képest másodpercenként tíz fordulatot tenne, és így a centrifugális erők valóban szétszakítanák. Hátborzongató, hogy mit tud a relativitás.

Óriás hullámok Miller bolygóján

Vajon mi okozhatta a két gigantikus, 1,2 kilométer magas hullámot, amelyek lecsaptak a Rangerre, miközben Miller bolygójának óceánján ringatózott (17.5. ábra)?

Kicsit kutakodtam, végeztem néhány fizikai számítást, és két lehetőséget találtam a filmhez fűzött tudományos magyarázatom számára. Mindkettőhöz az kell, hogy a bolygó Gargantua körüli keringése *ne teljesen* legyen kötött: a Gargantuához képest kismértékben előre-hátra kell hintáznia, a 17.6. ábra bal oldalán látható helyzetből a jobb oldali pozícióba, majd vissza és így tovább.

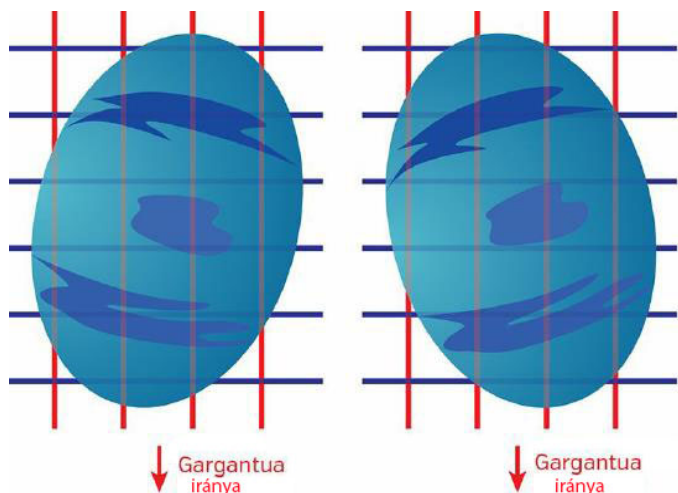
Ez a billegés természetes dolog, amint azt a Gargantua árapályerői kapcsán is láthatjuk.

A 17.6. ábrán az árapályerőket a *tendex-vonalak* (4. fejezet) segítségével magyarázom. Nem számít, hogy a forgási ellipszoid tengelye merre áll (a 17.6. ábrán balra vagy jobbra), a Gargantua



17.5. ábra

Gigantikus hullám csap le a Rangerre



17.6. ábra.

Miller bolygójának hintázása a válasz a Gargantua árapályerőire: nyújtó (vörös) és összenyomó (kék) tendex-vonalak

kék színű, összenyomó tendex-vonalai tovább lapítják az oldalait, ez a hatás pedig igyekszik a bolygót visszafordítani a kívánatos helyzetébe, amelyben az egyik dudor éppen a Gargantua felé áll, a másik pedig az azzal ellentétes oldalon van (17.3. ábra). Hasonlóan, a Gargantua vörös színű, nyújtó tendex-vonalai az alsó dudort a Gargantua felé, a felsőt pedig azzal ellentétesen húzzák. Ez pedig szintén a kívánt irányba igyekszik beállítani a bolygót.

Az eredmény egyszerűen egy előre-hátra himbálódzó bolygó, már ha a hintázás amplitúdója elég kicsi ahhoz, hogy a bolygó köpenye ne porladjon szét. Amikor kiszámoltam a hintázás periódusát, hogy mennyi ideig tart, amíg balról jobbra fordul, majd vissza, megnyugtató választ kaptam. Körülbelül egy óra. Ugyanannyi, mint amennyi két óriáshullám között telik el, és amit Chris anélkül választott meg így, hogy tudott volna a fenti gondolatmenetemről.

Értelmezésemben az óriás hullámok egyik magyarázata a Gargantua árapályerőinek hatására hintázó bolygó óceánjainak "löttyögése".

Hasonló jelenség a Földön is megfigyelhető dagályhullámok tornájában a tengerbe ömlő folyók tölcsértorkolatában. Ha jön a dagály, egy vízfal hatolhat be a folyóba, amely általában kicsi, esetenként azonban tekintélyes magasságot is elérhet. A 17.7. ábra felső részén láthatunk rá egy példát, a kínai Hangcsou tartomány Csian-tang folyójának dagályhullámát 2010 augusztusában. Bár lenyűgöző, ez a dagályhullám nagyon kicsi Miller bolygójának 1,2 kilométer magas hullámaival összehasonlítva. De a Hold árapályereje is kicsi, ami ezt a dagályhullámot hajtja, nagyon kicsi a Gargantua óriási árapályerőéhez képest!

Másik magyarázatom a szökőár. Amint Miller bolygója hintázik, a Gargantua árapályerői talán nem tudják felőrölni a kérgét, deformálni azonban igen, mégpedig egyórás periódussal, és ezek a deformációk könnyen okozhatnak hatalmas földrengéseket (vagy „millerrengéseket”, azt hiszem, inkább így kellene hívnunk). A miller-rengések pedig szökőárakat indíthatnak a bolygó óceánjaiban, sokkal nagyobbakat, mint amilyenek a Földön valaha is előfordultak - például 2011. március 11-én a japán Mijako városára lecsapó cunami (a 17.7. ábra alsó része).



17.7. ábra

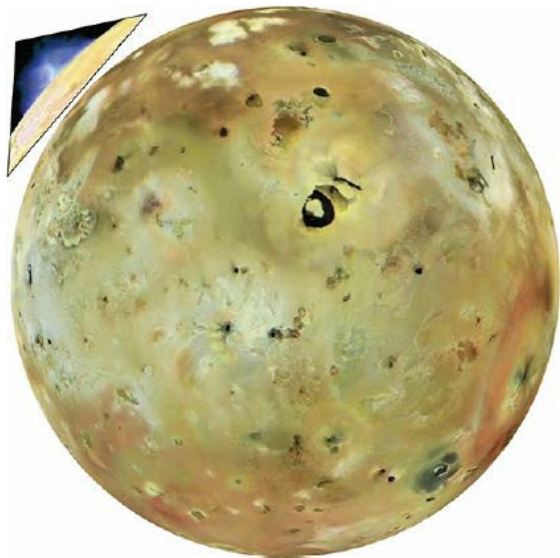
Fent: Dagályhullám a Csiantang folyón.

Lent: Cunami Mijakó városában



Miller bolygójának története

Érdekes lehet eltöprengeni Miller bolygójának múltján és jövőjén. Megpróbálkozhatunk ezzel saját fizikai ismereteink alapján is, vagy a világhálóról, esetleg máshonnan szerezhetünk hozzá tudást. (Ez egyáltalán nem könnyű!) Néhány dolog, amin érdemes elgondolkodni.



17.8. ábra

A Galileo űrszonda Io holdról készült felvételén sok vulkán és lávafolyam látható

Kis kép Egy vulkánkitörés 50 kilométer magasra jutó anyaga

Milyen korú Miller bolygója: Ha szélsőséges hipotézisként feltesszük, hogy jelenlegi pályáján született, amikor a galaxisa meg nagyon fiatal volt (mintegy 12 milliárd évvel ezelőtt), és a Gargantua is mindig ilyen gyorsan forgott, akkor a bolygó kora körülbelül 12 milliárd év osztva 60 ezerrel (az időlassulás mértéke a bolygón), azaz 200 ezer év. Borzasztóan fiatal a földi geológiai folyamatok hosszával összevetve. Lehetne-e Miller bolygója ilyen fiatal, és nézhetne-e ki úgy, ahogyan kinéz? Kialakulhatnának-e a bolygó óceánjai és oxigénben gazdag légköre ilyen gyorsan? Ha nem, akkor létrejöhetett-e a bolygó máshol, hogy később onnan a Gargantuához közeli pályájára vándoroljon: Mennyi ideig billeghet még folyamatosan a bolygó, mire a belsejében ható

súrlódás az összes „hintázási” energiáját felemészti, és hővé alakítja? Egyáltalán, mióta hintázhat.” Ha 200 ezer évnél sokkal rövidebb ideje, akkor valaminek be kellett indítania ezt a mozgást. Vajon mi lehetett ez?

Ha a súrlódás a hintázás mozgási energiáját hővé alakítja, miiven forró lehet a bolygó belseje: Elég forró ahhoz, hogy vulkánkitöréseket és lávafolyamokat okozzon:

A Jupiter Io nevű holdja figyelemre méltó példát szolgáltat ezekre a folyamatokra. A bolygóhoz legközelebb keringő nagy hold ugyan nem hintázik, de elliptikus pályáján hol közelebb jár a Jupiterhez, hol távolabb tőle, így a bolygótól származó növekvő és csökkenő árapályerőt felváltva érzékeli, hasonlóan ahhoz, ahogyan Miller bolygója érzékeli a Gargantua oszcilláló árapályerejét. Ez pedig eléggé felmelegíti az Io belsejét ahhoz, hogy nagy vulkánkitöréseket és lávafolyamokat produkáljon.

A Gargantua látványa Miller bolygójáról

A Csillagok között-ben, miközben a Ranger Cooperrel és a legénységgel megközelíti Miller bolygóját, a Gargantuát látjuk az égen - átmérője 10 fok (hússzor nagyobb, mint a Hold a Földről nézve!) - és egy fényes akkréciós korongot körülötte. (17.9. ábra) Bár így is rémisztően lenyűgöző,



17.9. ábra

A Miller bolygólya által félig elfedett Gargantua és akkréciós korongja előterében az ereszkedést éppen megkezdő Rangerrel.

a Gargantua látszó mérete a filmben jelentősen kisebb lett, mint amilyennek valójában látszana Miller bolygójának közeléből.

Ha Miller bolygója valóban elég közel van a Gargantuához a szélsőséges időlassulás fellépéséhez - miként ezt a magyarázatomban feltettem akkor mélyen a Gargantua görbült terének hengeres régiójában kell keringenie, mint azt a 17.1. ábra is mutatja. Valószínűnek tűnik, hogy Miller bolygójáról a hengerbe lefelé nézve a Gargantuát fogjuk látni, felfelé tekintve pedig a külső világegyetemet, így a Gargantua a bolygó égboltjának durván egyik felét (180 fok), az univerzum pedig a másikat foglalja el. Ezt jósolják Einstein relativisztikus törvényei.

Az is világos, hogy mivel Miller bolygója a fekete lyukhoz legközelebbi stabil objektum, amely nem hullik a Gargantuába, az egész tömegbefogási korongnak Miller bolygójának pályáján kívül kell elhelyezkednie. Ezért, miközben a legénység megközelíti a bolygót, felettük az óriási korongot kell látniuk, alattuk pedig a fekete lyuk hatalmas árnyékát. Ismét csak az einsteini törvényeknek megfelelően.

Ha Chris meg akart volna felelni ezeknek a követelményeknek, akkor tönkretette volna a filmjét. Ha a nézők a film ezen szakaszában ilyen fantasztikus látvánnyal szembesülnek, a csúcspont - Cooper fekete lyukba zuhanása — vizuálisan már semmi újdonságot nem hozott volna. Ezért Chris ezt a látványt tudatosan a film fináléjára tartogatta, és művészi szabadságával élve a Gargantua és anyagbefogási korongja Miller bolygójának közeléből érzékelhető méretét „csak” a Hold Földről látható átmérője hússzorosának választotta. Bár tudós vagyok, és a tudományos-

fantasztikumban is a pontosságra törekszem, egyáltalán nem hibáztathatom Christ. Magam is hasonlóan tettem volna, ha nekem kellett volna dönteni. És a kedves olvasó nekem is megköszönte volna.

18. A Gargantua rezgései



Míg Cooper és Amelia Brand Miller bolygóján vannak, Romilly az *Endurance* fedélzetén marad, hogy a Gargantuát figyelje. A kivételesen pontos észlelésektől azt reméli, hogy többet tudhat meg a gravitációs anomáliákról. Mindenekelőtt (felteszem) abban bízik, hogy a Gargantua szingularitásából (26. fejezet) származó kvantuminformáció kiszivároghat az eseményhorizont mögül, adatokat szolgáltatva ahhoz, hogyan lehetne kontrollálni a gravitációs anomáliákat (24. fejezet), Romilly tömör megfogalmazásában segítséget nyújtva a „gravitáció megoldásához”.

Amikor Amelia Brand visszatér Miller bolygójáról, Romilly azt mondja neki: „Amit lehetett, megtudtam a fekete lyukról. De semmit nem tudtam küldeni az apjának. Vételünk van, de semmi sem jut ki.” Mit tudott meg Romilly? Nem részletezte ugyan, de úgy vélem, a Gargantua rezgéseire koncentrált, így ebben a fejezetben én is ezzel foglalkozom.

A fekete lyukak rezgései

1971-ben egyik calteches hallgatóm, Bill Press felfedezte, hogy a fekete lyukak képesek speciális, ún. *rezonáns frekvenciákon* vibrálni, nagyon hasonlóan ahhoz, ahogyan a hegedű húrjai is rezegnek.

Ha egy hegedűhúrt megfelelően pendítünk meg, akkor egy nagyon tiszta hangot ad ki: egyetlen frekvenciájú hanghullámot kelt. Ha egy kicsit másként pengetjük, hallhatjuk a tiszta hangot és annak felharmonikusait. Más szavakkal (ha a húrt rendesen fogják le, azaz a leszorító ujj nem mozog) a húr rezgése csak diszkrét (jól elkülöníthető) frekvenciájú hanghullámokat kelt, ezek a húr rezonáns frekvenciái.

Ugyanez igaz egy borospohár esetében is, ha a száját az ujjunkkal dörzsölgetjük, vagy egy kalapáccsal ütögetett harangnál. Press arra az eredményre jutott, hogy egy behulló valami által megzavart fekete lyuk is ezt csinálja.

Egy évvel később egy másik hallgatóm, Saul Teukolsky Einstein relativisztikus törvényei alapján a forgó fekete lyukak rezonáns rezgéseinek matematikai részleteit is kidolgozta. (Ez a legjobb dolog a calteches oktatással kapcsolatban: kiváló hallgatóink vannak!) Teukolsky egyenleteit megoldva a fizikusok ki tudják számolni a fekete lyuk rezonáns frekvenciáit. A Gargantuához hasonlóan extrém gyorsan forgó fekete lyukakra azonban nagyon nehéz megoldani az egyenleteket. Annyira, hogy teljesen jól csak negyven év múlva sikerült egy olyan együtműködés keretében, amelynek vezetői ismét csak calteches diákok voltak: Huan Yang és Aaron Zimmerman.

2013 szeptemberében Ritchie Kremer, a *Csillagok között* kellékesé azt kérte tőlem, hogy adjak neki olyan észlelési adatokat, amelyeket Romilly megmutathat Brandnek. Természetesen a legjobb szakértőkhöz fordultam a világon: Yanghoz és Zimmermanhoz. Ők a Teukolsky-egyenleteket használó számításaik alapján gyorsan összeállították a Gargantua rezonáns frekvenciáit listázó táblázatokat, amelyek tartalmazták a gravitációs hullámok okozta energiaveszteség miatti lecsengési rátákat is. Kreáltak hozzá az elméleti előrejelzéseknek megfelelő hamis észlelési adatokat is, én pedig hozzátettem a Gargantua eseményhorizontjának (pontosabban az árnyéka szélének) képét a Double Negative vizuális effektusokért felelős részlege által készített szimulációból. Az eredmény lett Romilly észlelési adatsora.

Amikor Christopher Nolan azt a jelenetet forgatta, amelyben Romilly megbeszéli a megfigyeléseit Amelia Branddel, valójában nem mutatta meg neki az adatokat. Az asztalon heverték, de nem emelte fel azokat. Én azonban fontos szerepet szánok nekik a *Csillagok között* tudományos háttérének feltárásában.

A Gargantua rezonáns rezgései

A 18.1. ábra a táblázat első oldalát mutatja. Az oldal mindegyik adatsora egy rezonáns frekvenciát tartalmaz, amellyel a Gargantua rezeghet.

Az első oszlop a Gargantua rezgésének alakját jellemző háromjegyű kód, a kép pedig a háttértörténetemben a Romilly által készített hímből származik, amellyel azt ellenőrizte, hogy a rezgések alakja megfelel-e a vártnak. A második adatoszlop a rezgési frekvencia, míg a harmadik a rezgések Teukolsky-egyenletek által jósolt lecsengési üteme⁵². A negyedik és ötödik oszlop a Romilly által jósolt és az elmélet által előre jelzett értékek közti különbségeket mutatja. A táblázatban látható rezonáns frekvenciák numerikus értékei nem a megszokott egységekben vannak megadva. Ehhez meg kell szorozni azokat a fénysebesség köbével és el kell osztani $2\pi GM$ -mel, G a Newton-féle gravitációs állandó, M pedig a Gargantua tömege. Ez az átszámítási tényező óránként nagyjából egy rezgésnek felel meg, így a táblázat első frekvenciája körülbelül 0,67 rezgés óránként. A lecsengési ütemekre vonatkozó átszámítási tényező ugyanez.

⁵² A táblázatban látható rezonáns frekvenciák numerikus értékei nem a megszokott egységekben vannak megadva. Ehhez meg kell szorozni azokat a fénysebesség köbével és el kell osztani $2\pi GM$ -mel, ahol $\pi=3,14159\dots$, G a Newton-féle gravitációs állandó, M pedig a Gargantua tömege. Ez az átszámítási tényező óránként nagyjából egy rezgésnek felel meg, így a táblázat első frekvenciája körülbelül 0,67 rezgés óránként. A lecsengési ütemekre vonatkozó átszámítási tényező ugyanez.

Háttértörténetemben Romilly talál néhány anomáliát, komoly eltérést a megfigyelési eredményei és az elmélet jóslatai között. Ezeket vörössel nyomtatta. Az adatsor első oldala (18.1. ábra) csak egyetlen ilyet tartalmaz, de az eltérés nagyon nagy: harminckilencszer nagyobb, mint a méréseinek hibája!

Nálam Romilly úgy véli, ezek az anomáliák segíthetnek a „gravitáció megoldásában” (annak megértésében, hogyan használhatók ki az anomáliák). Nagyon szeretné visszaküldeni Brand professzornak a Földre, amit megtudott, de a kifelé irányuló kommunikáció megszakadt, így rendkívül csalódott.

Még ennél is jobban vágyik azonban arra, hogy a Gargantua belsejébe pillanthasson, és megszerezze a szingularitásba zárt kulcsfontosságú kvantuminformációt (26. fejezet). De ez nem megy.

Azt sem tudja, hogy az általa észlelt anomáliákba bele van-e kódolva a kvantuminformáció egy része vagy sem. Mivel a fekete lyuk nagyon gyorsan forog, valami talán átszivároghat belőle az eseményhorizonton, és létrehozhatja az anomáliákat. Talán Brand professzor rájöhetne a megfejtésre, ha Romilly el tudná küldeni neki adatokat.

Később sokkal több szó esik még a gravitációs anomáliákról és a Gargantua belsejéből származó kvantuminformációról, mint az anomáliák kihasználásának kulcsáról. De ez később lesz. Most folytassuk a Gargantua környezetének felderítését, induljunk Mann bolygójára.

GARGANTUA

Quasinormal Mode Frequencies – Averaged Over All Data

DM Family

Mode	Theory		Observed/Theory - 1	
(l,m,n)	Re(ω) M	Im(ω) M	Re(ω) M	Im(ω) M
(2,1,0)	0.6664799	0.05541304	0.000054±23	0.00038±44
(2,1,1)	0.6665907	0.1662391	0.000008±8	0.00025±26
(2,1,2)	0.6667016	0.2770652	0.000040±17	0.00039±39
(2,1,3)	0.6668124	0.3878913	0.000016±24	0.00051±8
(2,1,4)	0.6669232	0.4987174	0.000003±25	0.00005±8
(2,0,0)	0.5235067	0.0809975	0.000057±10	0.00017±19
(2,0,1)	0.5236687	0.2429925	0.000029±9	0.00065±13
(2,0,2)	0.5238307	0.4049875	0.000005±31	0.00042±15
(2,0,3)	0.5239927	0.5669825	0.000023±12	0.00039±50
(2,0,4)	0.5241547	0.7289775	0.000041±61	0.00003±46
(3,2,0)	1.0749379	0.03192427	0.000014±91	0.00009±71
(3,2,1)	1.0750018	0.09577282	0.000019±32	0.00021±24
(3,2,2)	1.0750656	0.1596214	0.000004±25	0.00006±21
(3,2,3)	1.0751295	0.2234699	0.000024±14	0.0011±19
(3,2,4)	1.0751933	0.2873185	0.000032±38	0.00007±28
(3,1,0)	0.8623969	0.06574082	0.000004±74	0.00051±27
(3,1,1)	0.8625284	0.1972225	0.00039±1	0.00016±9
(3,1,2)	0.8626599	0.3287041	0.000019±35	0.00057±41
(3,1,3)	0.8627914	0.4601857	0.000030±35	0.00002±21



18.1. ábra

Az első oldala annak az adattáblázatnak, amelyet Yang és Zimmerman készített, hogy Romilly megmutathassa Amelia Brandnek

19. Mann bolygója



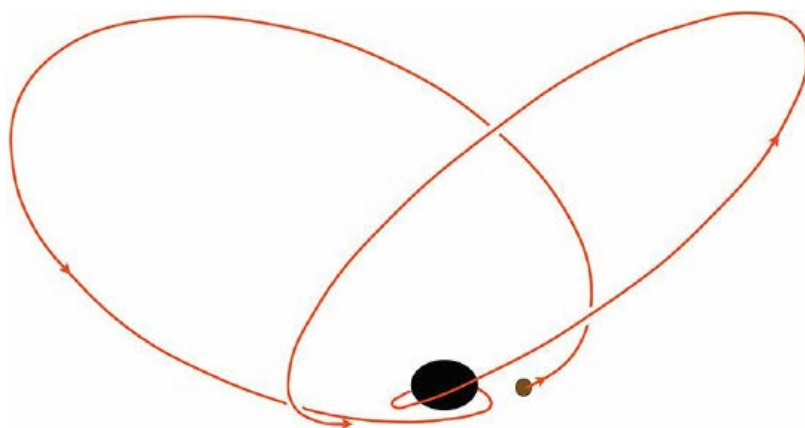
Miután kiderült, hogy Miller bolygója nem megfelelő az emberiség számára, Cooper és legénysége elindul Mann bolygójára.

A bolygó pályája és a nap hiánya

Mann bolygójának valószínű pályáját a *Csillagok között* két információmorzsájából származtattam.

Először is Doyle azt mondja, hogy Mann bolygójára hónapokig fog tartani az út. Ebből arra következtetek, hogy amikor az *Endurance* megérkezik Mann bolygójához, annak messze kell lennie a Gargantua közvetlen szomszédságától, ahol az utazás kezdődött. Másodszor, közvetlenül azután, hogy az *Endurance* egy része felrobbant a Mann bolygója körüli pályán, a legénység úgy érzékeli, hogy a gravitáció a Gargantua eseményhorizontja felé vonzza azt. Ebből pedig arra következtetek, hogy amikor elhagyják Mann bolygóját, annak a Gargantua közelében kell lennie.

Mindkét követelményt csak úgy lehet kielégíteni, ha Mann bolygójának pályája nagyon elnyúlt. Annak elkerülésére pedig, hogy a bolygót elnyelje a Gargantua akkréciós korongja, a pályának, amennyire



19.1. ábra.

Mann bolygójának egy lehetséges pályája, amelyet David Saroff felhasználóbarát webes alkalmazásával számoltam ki, lásd <http://demonstrations.wolfram.com/3DKerrBlackHoleOrbits/>

lehet, messze a Gargantua - egyben a korong - egyenlítői síkja felett és alatt kell húzódnia.

A feltételeknek megfelelőhöz hasonló pályát mutat a 19.1. ábra, noha sokkal messzebb, 600 Gargantua-sugárnyira vagy még távolabb nyúlik a fekete lyuktól ⁵³. A Halley-üstökös

⁵³ A filmben, miközben az *Endurance* a Mann bolygója körüli pályán kering, a Gargantuát körülbelül 0,9 fok kiterjedésűnek láthatjuk az égen, ez közel kétszerese annak, amekkorának a Hold látszik a Földről. Ebből számoltam ki, hogy Mann bolygója körülbelül 600 Gargantua-sugárra van a fekete lyuktól. Ebből a távolságból a bolygó legalább

naprendszerbeli mozgásához (7.5. ábra) hasonlóan a bolygó a Gargantua közelében megkerüli azt, majd messze eltávolodik tőle, visszatér, újra megkerüli a fekete lyukat, majd újra eltávolodik, és így tovább. A tér Gargantuához közeli örvénylése miatt a bolygó minden megközelítés alkalmával egyszer vagy kétszer körbe is jár a fekete lyuk körül, és a pálya is nagy szöggel elfordul egyik periódusról a másikra, ahogyan azt az ábra is mutatja.

Mann bolygóját oda-vissza tartó útja során nem kísérheti nap mivel a Gargantua közelében a hatalmas árapályerők elszakítanak a bolygót és csillagát egymástól, szemmel láthatóan különböző kifelé tartó pályákra irányítva azokat. Ezért, Miller bolygójához hasonlóan, hót és fényt is csak a Gargantua vérszegény tömegbefogási korongjától kaphat.

A Mann bolygójára vezető út

Az *Endurance* Mann bolygójára vezető útja a Gargantua közelében kezdődik, és messze attól ér véget. Egy ilyen út - álláspontom szerint - két gravitációs lendítést (7. fejezet) igényel, egyet az út elején, egyet pedig a végén.

Az elején a kihívás kettős: A Gargantua körüli parkolópályáján az *Endurance* a fénysebesség harmadával ($c/3$) mozog, a körpályát azonban sugárirányú, a Gargantuától távolodó mozgással kell alakítani. De az *Endurance* nem elég gyors. A Gargantua gravitációs vonzása olyan erős, hogy ha az *Endurance* sebessége a radiális pályára állva még mindig csak $c/3$, a fekete lyuk már akkor megállítaná, amikor még csak az út töredékét tette meg. A Gargantua vonzásának legyőzéséhez és Mann bolygójának ugyanakkora sebességgel történő eléréséhez, mint amekkorával az mozog - ez nagyjából $c/20$ - az első lendítésnek az *Endurance*-t közel a fénysebesség felére kell gyorsítania. A végrehajtáshoz Coopernek találnia kell egy megfelelő helyen lévő és megfelelő sebességgel mozgó közepes tömegű fekete lyukat (IMBH).

Ez egyáltalán nem könnyű feladat, és ha sikerül is, pályájának jó pontján és jó pillanatban kell elérni. A hónapokig tartó út legnagyobb része az IMBH elérésével telhet, de az is sok ideig tarthat, hogy találjanak ilyet. Ha a lendítés megtörtént, akkor a Mann bolygójához vezető út, a $c/2$ kezdeti sebességről fokozatosan $c/20$ -ra lassítva, mintegy negyven napot vesz még igénybe.

negyven nap alatt érhet csak be a Gargantua közelébe, ami sokkal hosszabb, mint amennyi időt a legénység láthatólag a bolygó közelében töltött, de elfogadható a bolygóhoz kifelé tartó út hosszára, lásd a 7. fejezetet.

A második lendítés során, Mann bolygójának közelében, az *Endurance* egy alkalmas IMBH körül lassul le, hogy finoman találkozhasson a bolygóval. Ez a manőver nem igényel sok üzemanyagot.



19.2. ábra.

A Ranger megkarcolja egy „jégfelhő” szélét Mann bolygóján

Megérkezés Mann bolygójára: Jégfelhők

A filmben az *Endurance* parkolópályára áll Mann bolygója körül, Cooper és a legénység pedig a Rangerrel száll le a bolygóra, amelyet jég borít, ahogyan azt várhattuk is, mivel (legalábbis az én értelmezésemben) az idő nagy részét a Gargantua anyagbefogási korongjának melegétől távol tölti. Miközben a Ranger közeledik hozzá, úgy érezhetjük, mintha felhők között manőverezne, de aztán megkarcolja az egyiket (19.2. ábra), és rájövünk, hogy a felhő valójában valamilyen jégből van.

Paul Franklinnel folytatott egyik beszélgetésem által ösztönözve úgy képzelem, hogy ezek a felhők főleg fagyott szén-dioxidból - szárazjégből - állnak, és felmelegszenek, amikor a bolygó a 19.1. ábrán látható pályáján befelé mozogva az akkréciós korong közelébe ér. Ha felmelegszik, a szárazjég szublimál - a jég gőzzé válik - így az, ami felhőnek tűnik, szárazjég és szublimált gőz keveréke lehet, és talán az utóbbiból van benne több. Lejjebb, ahol a Ranger leszáll, a hőmérséklet magasabb és a jég, amelyen landolnak, feltehetően teljes egészében fagyott víz.

Dr. Mann geológiai adatai

A filmben dr. Mann szerves anyagok után kutat a bolygóján, és azt állítja, hogy ígéretes nyomokra bukkant. Ígéretesek, de nem perdöntőek. Adatait meg is mutatja Brandnek és Romillynek.



19.3. ábra.

Fent: Romilly (David Gyasi) és Brand (Anne Hathaway) dr. Mann-nel annak geológiai adatairól beszélgetnek. Lent: Az Erika Swanson által a film számára előállított adatsor egyik oldala: a bolygó állítólagos felszínén gyűjtött kőzetek kémiai analízisének eredményei. Több kőzet mutat szerves, élő organizmusokhoz köthető anyag je lenlétére utaló ígéretes nyomokat.

sample	cytochromes	Redox enzymes	PA hydrocarbons	formaldehyde
EBL-VR01	0.03	0.379	8.7	1.64
EBL-VR03	0.02	0.103	2.3	1.20
EBL-VR04	0.02	0.170	3.9	1.38
EBL-OS01	0.02	0.128	2.9	1.28
EBL-OS02	0.01	0.038	0.8	0.88
EBL-OS04	0.01	0.020	0.4	0.71
GBO-VR01	0.04	0.426	9.7	1.67
GBO-VR02	0.02	0.155	3.5	1.34
GBO-VR03	0.01	0.015	0.3	0.64
GBO-VR05	0.02	0.115	2.6	1.24
GBO-OS01	0.04	0.613	14.0	1.76
GBO-OS02	0.00	0.009	0.1	0.50
GBO-OS03	0.02	0.115	2.6	1.24
GBO-OS04	0.03	0.237	5.4	1.49
EFO-VR02	0.01	0.053	1.2	0.98
EFO-VR03	0.02	0.186	4.2	1.41
EFO-VR05	0.02	0.103	2.3	1.20
EFO-VR08	0.05	0.938	21.5	1.79
EFO-VR11	0.07	1.648	37.9	1.64
EFO-OS01	0.00	0.003	0.0	0.25
EFO-OS02	0.03	0.219	5.0	1.46
EFO-OS03	0.01	0.045	1.0	0.93
EFO-KS01	0.02	0.128	2.9	1.28

interesting

very promising!

Az adathalmaz a kőzetminták gyűjtési helyeiből és az ottani geológiai viszonyokat jelző terepi feljegyzésekből, valamint a minták kémiai elemzésének eredményeiből áll. A kémiai analízis dr. Marin bizonyítéka a szerves anyag létezésére.

A film számára az adatokat a Caltech tehetséges geológus PhD-hallgatója, Erika Swanson állította elő. Erika dr. Mannéhoz hasonló terepi munkát és kémiai analízist végez.

A filmben kiderül, hogy dr. Mann hamisította az adatait. Ez természetesen vicces, mivel Erika is pontosan így tett, hiszen soha nem végzett terepmunkát Mann bolygóján. Talán egy napon...

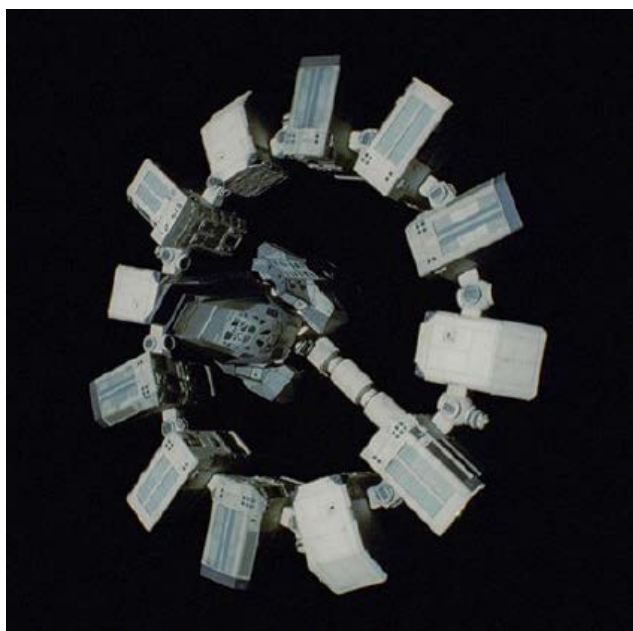
A könyvben nem térek ki dr. Mann emberi tragédiájára, amelyben a tudománynak csak kis szerepe van. Ennek a szálnak a csúcspontja az Endurance-t komolyan megrongáló robbanás. A robbanás, a kár és az Endurance konstrukciója: ez már tudomány és technológia, foglalkozunk hát ezzel!

20. Az *Endurance*



Árapályerők és az *Endurance* konstrukciója

Az *Endurance*-nek tizenkét modulja van gyűrű alakban összefűzve, egy irányítóegységgel a gyűrű középpontjában. A központi modulhoz két leszállóegység és két Ranger csatlakozik.



20.1. ábra.

Az *Endurance* a központ, vezérlőmodulhoz csatlakozó két Rangerrel és a két leszállóegységgel. A Rangerek az *Endurance* gyűrűjének síkjából kifelé állnak, a leszállóegységek párhuzamosak azzal.

Kutatói álláspontom szerint az *Endurance* konstrukciója olyan, hogy képes legyen ellenállni az óriási árapályerőknek. Ez különösen fontos volt akkor, amikor átkelt a féregjáraton. Az *Endurance* gyűrűjének átmérője 64 méter, ami a féreglyuk területének közel 1 százaléka. Az acél és egyéb szilárd anyagok eltörnek vagy képlékennyé válnak, ha néhány tized százaléknál nagyobb deformációknak vannak kitéve, így a veszély nyilvánvaló. Ráadásul nagyon kevés információ állt rendelkezésre arról, hogy mi vár az *Endurance*-re a féreglyuk túloldalán a Gargantua megközelítésekor, ezért úgy tervezték, hogy a féregjáraténál sokkal nagyobb árapályerőket is kibírjon.

Egy vékony szálból bonyolult alakzatok is hajlíthatók anélkül, hogy a szál anyagának bármely része a kritikus 1 százalékot akár csak megközelítő mértékben is deformálna. A kulcs a szál vékonysága. Úgy képzelhetjük, hogy az *Endurance* szilárdságát nagyszámú, a gyűrű mentén kifeszített vékony szál szolgáltatja, mint a függőhidakat tartó kábelkötegek, amelyek erős szélben szükség szerint tudnak hajlani. Ez azonban *túlságosan* hajlékonyá tenné a gyűrűt, amelynek sokkal merevebbnek kell lennie. Az árapályerők hatására nem deformálódhat annyira, hogy a modulok egymásnak ütközhesse.

Értelmezésem szerint a tervezők keményen dolgoztak azon, hogy az *Endurance* ellenálljon a deformációknak, ugyanakkor rugalmas is legyen, hogy ne szakadjon szét, ha a vártnál sokkal nagyobb árapályerők hatása alá kerül.

Robbanás a Mann bolygója körüli pályán

A tervezési koncepció egyértelműen igazolja jogosságát, amikor dr. Mann akaratlanul hatalmas robbanást okoz, amely széttöri az Endurance gyűrűjét, két modult megsemmisít, további kettőt pedig megrongál.

A robbanás annyira felgyorsítja a gyűrű forgását, hogy a modulok 70 g centrifugális gyorsulást érzékelnek, ami a földfelszíni gravitációs gyorsulás 70-szerese. Roncsolt végei



20.2. ábra.

Balra: Robbanás az Endurance-en. felül a leszállóegység, alul Mann bolygója (A tíz sugárirányú fénynyaláb lencsecsillogás, amelyet a kamera lencserendszerében szóródó fény okoz. nem pedig a robbanás.) Jobbra: A megsérült Endurance a robbanás

eltávolodnak egymástól, de a gyűrű nem törik szét és a modulok sem ütköznek egymásnak. Véleményem szerint kitűnő példa okos mérnökök óvatos tervezésére!

Egyébként a filmbeli robbanás teljesen lenyűgözött. Az űrben a robbanásoknak nincs hangjuk, mivel nincs levegő, amelyben a hanghullámok terjedhetnének. Az Endurance robbanásának sincs hangja. Az űrbéli robbanások lángjai hamar elenyésznek, mivel az azokat tápláló oxigén gyorsan elillan. A filmben a lángok gyorsan kihunynak. Paul Franklin mesélte, hogy csapatával keményen dolgoztak azon, hogy ezt elérjék, mivel a robbanás valódi volt, nem számítógéppel megalkotott vizuális effektus. Újabb szép példája Christopher Nolan tudományos pontosság melletti elkötelezettségének.

A Gargantua környezetének bemutatása során a bolygók fizikájától (árapály-deformációk, szökőárok, dagályhullámok...), a Gargantua rezgéseinek és az élet szerves nyomainak keresésén keresztül mérnöki problémákig (az Endurance robusztus felépítése és a sérülését okozó robbanás) jutottunk. Bár nagyon élveztem ezeket a témákat, a legtöbbjükben még kutattam is vagy tankönyvet írtam róluk, mégsem részei legnagyobb szenvedélyemnek. Az ugyanis az extrém, az emberi tudás határait feszegető és azon túlmutató fizika. Erre a területre kalandozunk a következőkben.

VI. EXTRÉM FIZIKA

21. A negyedik és ötödik dimenzió

Az idő, mint negyedik dimenzió



Univerzumunkban a térnek három dimenziója van, fel-le, jobbra-balra, előre-hátra. Ha azonban barátnőnkkel szeretnénk találkozni, nem csak azt kell tisztázni, hogy hol, hanem azt is, hogy *mikor*.

Az idő azonban másfajta dimenzió, mint a tér. Nem okoz gondot számunkra, hogy akár balra, akár jobbra menjünk, csak elhatározás kérdése, és már indulhatunk is. Az időben azonban nem tudunk visszafelé utazni. Bárhogyan próbálkozunk is, csak előre haladhatunk. Ezt a relativisztikus törvények biztosítják, sőt kikényszerítik⁵⁴.

Akárhogyan is, az idő *is* egy dimenzió, a negyedik dimenzió az univerzumban. Létezésünk színtere a négydimenziós téridő, három tér- és egy idődimenzióval.

Amikor mi, fizikusok kísérletek és a matematika segítségével felfedezzük ezt a színteret, rájövünk, hogy a tér és az idő különféle módokon kapcsolódik össze. Legegyszerűbb szintje ennek, hogy ha például a térben messze tekintünk, automatikusan az időben is visszapillantunk, mivel az információt hordozó fénynek időre van szüksége, hogy eljusson hozzánk. Egy tőlünk egymilliárd fényévre lévő kvazárt olyan állapotában látunk, amilyenben egymilliárd évvel ezelőtt volt, amikor távcsövünket elérő fénye elindult hosszú útjára.

Sokkal mélyebb szintje a kapcsolatnak, hogy ha például egymáshoz képest nagy sebességgel mozgunk, akkor nem fogunk egyetérteni abban, hogy melyek az egyszerre bekövetkező események. Egyikünk úgy ítélheti, hogy a Napon és a Földön bekövetkezett egy-egy robbanás egyszerre történt, míg másikunk azt mondhatja, hogy a földi öt perccel korábban volt. Ebben az értelemben amit egyikünk tisztán térbeli elkülönülésnek gondol, azt a másikunk időbelinek is látja.

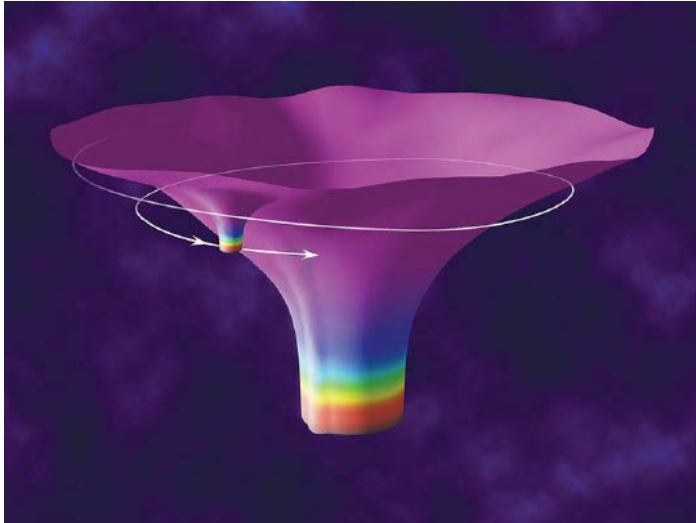
A térnek és időnek ilyen összefonódása ellen ösztöneink tiltakoznak ugyan, az mégis alapvető jelentőségű az univerzum szerkezete szempontjából. Szerencsére eltekinthetünk tőle a könyv nagy részében, a 30. fejezet kivételével.

⁵⁴ A relativisztikus törvények kerülő úton azonban lehetővé teszik az időben visszafelé utazást: kilépünk a térből, majd visszatérünk, mielőtt elindultunk volna. A 30. fejezetben még foglalkozunk ezzel a problémával.

Befoglaló tér: Létezik?



A könyvben univerzumunk görbült terét egy kétdimenziós görbült membránnal (vagy bránnal) szemléltetem, amely a háromdimenziós befoglaló térben helyezkedik el, ahogyan például azt a



21.1. ábra.

Egy nagy fekete lyukba spirálozó kisebb fekete lyuk, ahogyan egy térdimenzió elhagyásával a befoglaló térből látszik.

21.1. ábra is mutatja. A valóságban persze bránunknak három térdimenziója van, a befoglaló térnek pedig négy, azonban nem vagyok jó rajzoló, így ábráimon általában elhagyok egy térdimenziót.

Tényleg létezik a valóságban a befoglaló tér, vagy csak képzeletünk szülötte? Az 1980-as évekig a legtöbb fizikus - köztük én is - úgy vélte, hogy ez utóbbi.

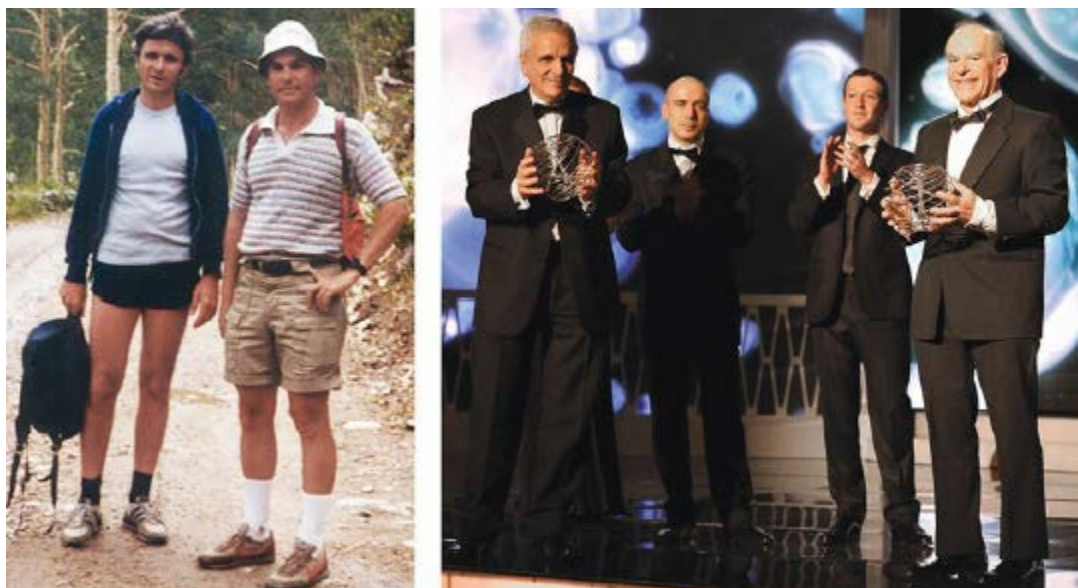
De hogyan lehetne csak képzelgés? Hát nem tudjuk biztosan, hogy univerzumunk tere görbült? Nem igazolták a görbület létét nagy pontossággal a Viking-űrszondáknak küldött jelek? (4. fejezet)

De igen... S mivel terünk valóban görbült, nem egy magasabb dimenziós térbe, a befoglaló térbe ágyazva görbül?

Nem. Univerzumunk anélkül is görbült lehet, hogy egy magasabb dimenziós befoglaló térben lenne. Mi, fizikusok a matematika eszközeivel a befoglaló tér nélkül is le tudjuk írni az univerzum görbületét. A befoglaló tér használata nélkül is fel tudjuk írni a görbületet szabályozó Einstein-féle relativisztikus törvényeket. Kutatásaink közben tulajdonképpen majdnem mindig így is járunk el. Az 1980-as évekig a befoglaló tér csak egy vizuális segédeszköz volt számunkra. Eszköz, amely segített megérteni az egész matematikáját, illetve segítette az egy más közötti és a nem fizikusokkal zajló kommunikációt. Vizuális mankó, nem pedig valóság.

Mit jelentene a befoglaló tér valóságos volta? Hogyan tudnánk ellenőrizni, hogy valóban létezik-e? A befoglaló tér akkor létezik, ha hatással van általunk mérhető dolgokra. Az 1980-as évekig azonban nem talákoztunk ilyen hatással a méréseinkben.

1984-ben azonban mindez megváltozott. Mégpedig radikálisan. Michael Green (University of



21.2. ábra.

Balra: Michael Green [balra] és John Schwarz túra közben 1984-ben a coloradói Aspenben, a nagy áttörésük idején. Jobbra: Michael Green (balra) és John Schwarz (Jobbra) az áttörést hozó eredményükért 2014-ben nekik ítelt hárommillió dolláros Fundamental Physics Prize átvételekor. Középen: Yuri Milna (a díj alapítója) és Mark Zuckerberg (a Facebook társalapítója).

London) és John Schwarz (Caltech) hatalmas áttörést ért el a kvantumgravitáció törvényeinek kutatásában⁵⁵. Meglepő módon eredményük azonban csak akkor működött, ha univerzumunk egy olyan befoglaló térbe ágyazott

brán, amelynek egy idő- és kilenc térdimenziója van - hattal több, mint a bránunknak. A Green és Schwarz által alkalmazott, szuperhúrelméletnek elnevezett matematikai formalizmusban a befoglaló tér extra dimenziói fizikai kísérletekkel mérhető alapvető hatást gyakorolnak bránunkra, már ha technológiánk elég jó a hatás kiméréséhez. Olyan lehetőséget tártak fel, amelynek segítségével a kvantumfizika és Einstein relativisztikus törvényei talán összeegyeztethetők.

A Green-Schwarz-áttörés óta mi, fizikusok nagyon komolyan vesszük a szuperhúrelméletet, és rengeteg munkát fektettünk a fejlesztésébe és kiterjesztésébe. Ennek következtében pedig nagyon komolyan vesszük azt a lehetőséget is, hogy a befoglaló tér valóban létezik, és befolyásolhatja univerzumunkat.

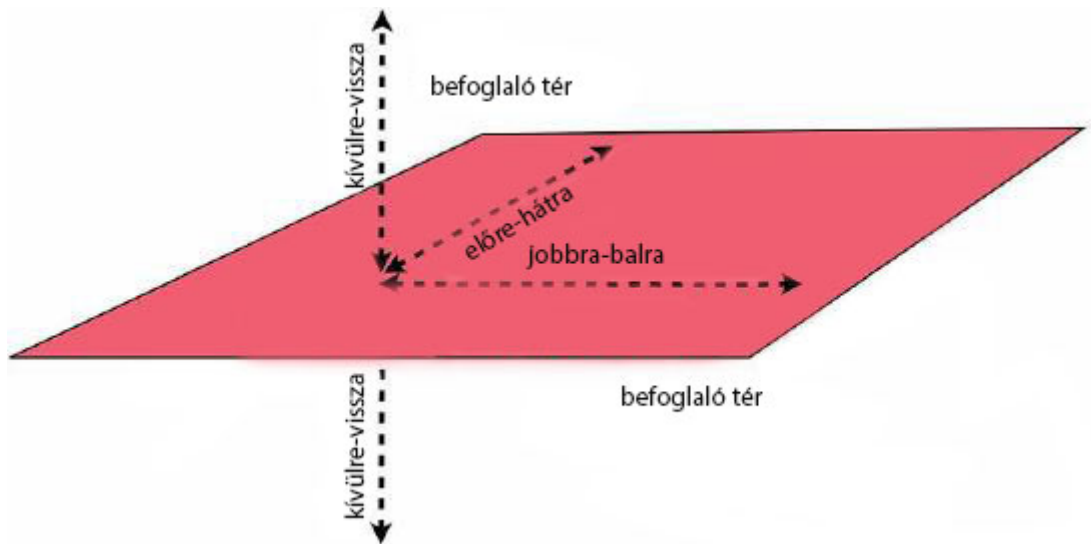
⁵⁵ Ennek rövid leírását lásd a 3. fejezetben.

Az ötödik dimenzió



Bár a szuperhúrelmélet szerint a befoglaló térnek hattal több térdimenziója van, mint az univerzumunknak, úgy tűnik, gyakorlati célokra elegendő csak egy extra dimenzió létének feltételezése.

Emiatt, meg azért, mert hat extra dimenzió kicsit sok egy sci-fi filmben, a *Csillagok között* befoglaló terének csak egy extra dimenziója van, azaz összesen öt. Három térdimenziója, a jobbra-balra, az előre-hátra és a fel-le közös a bránunkkal, és ez igaz a negyedikre, az időre is. A szintén térdimenzió ötödik, a kívülre-vissza, bránunkra merőlegesen, az alá és fölé terjed ki, ahogyan a 21.3. ábra mutatja.



21.3. ábra.

Az ötdimenziós befoglaló térben óránként elhelyezkedő négy téridődimenziós univerzumunk. Az ábrán két dimenziót elhagytam, az időt és az univerzumunk fel-le dimenzióját

A kívülre-vissza dimenzió főszerepet játszik a *Csillagok között*-ben, bár a professzor és a többiek nem használják a „kívülre-vissza” kifejezést, helyette csak „ötödik dimenzióként” utalnak rá. A kívülre-vissza központi szerepet játszik a következő két, valamint a 25., 29. és 30. fejezetekben is.

22. Hipertérbeli lények

2D-s brán és 3D-s befoglaló tér



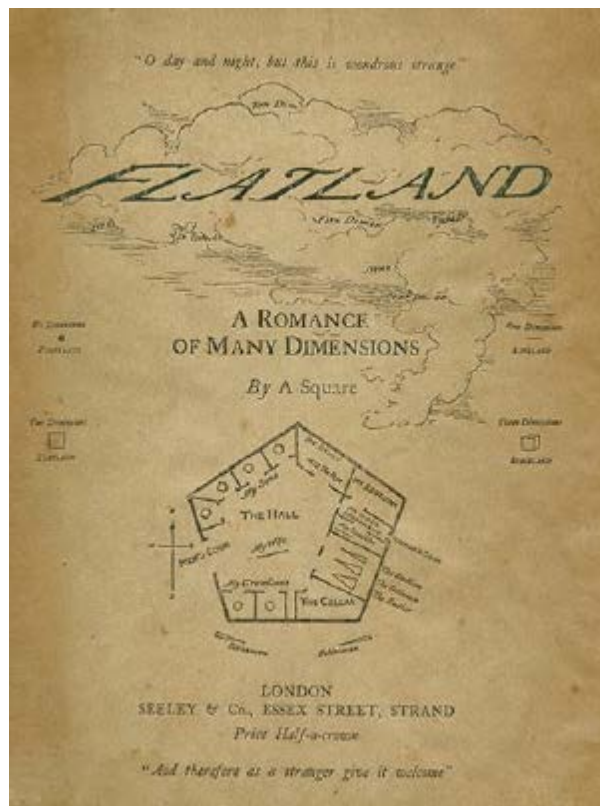
Edwin Abbott 1844-ben társadalmi szatírárt írt *Flatland: A Romance of Many Dimensions* címmel⁵⁶. Bár a viktoriánus kultúra pellengérre állítása ma már régiesnek hat, és a nőkkel kapcsolatos elképzelései is sértők, a kisregény színtere nagyon fontos a *Csillagok között* szempontjából. Melegen ajánlom elolvasását.

Egy négyzet alakú lény kalandjait meséli el, aki Síkföld kétdimenziós világában él. A négyzet meglátogatja az egydimenziós Egyenesföldet, a nulladimenziós Pontföldet, és a számára legérdekesebb háromdimenziós Térföldet is. Síkföldön tartózkodva pedig őt látogatta meg egy gömblény Térföldről.

Christopher Nolannel történt első találkozásom alkalmával örömmel állapítottuk meg, hogy mindketten olvastuk Abbott kisregényét, és tetszett is mindkettőnknek.

Abbott művének szellemében képzeljük el, hogy a négyzethez hasonlóan kétdimenziós lények vagyunk, akik a Síkföldhöz hasonló kétdimenziós világban élnek. Univerzumunk lehet például egy asztallap, egy papír vagy egy gumilepedő. A modern fizika szóhasználatával a kétdimenziós (2D-s) brán elnevezést fogom használni rá.

Tanulmányaink alapján feltételezzük, hogy létezik a 3D-s befoglaló tér, amelybe bránunk be van ágyazva, biztosak azonban nem vagyunk benne. Képzeljük el, milyen izgatottak lennénk, ha



22.1. ábra

A Flatland első kiadásának borítója

⁵⁶ A világhálón sok helyen hozzáférhető. Lásd például a „Flatland” szócikk végét a Wikipédián. (magyarul *Síkföld* címmel jelent meg Gálvölgyi Judit fordításában, és szintén elérhető elektronikus változatban is.) (A fordító megjegyzése)

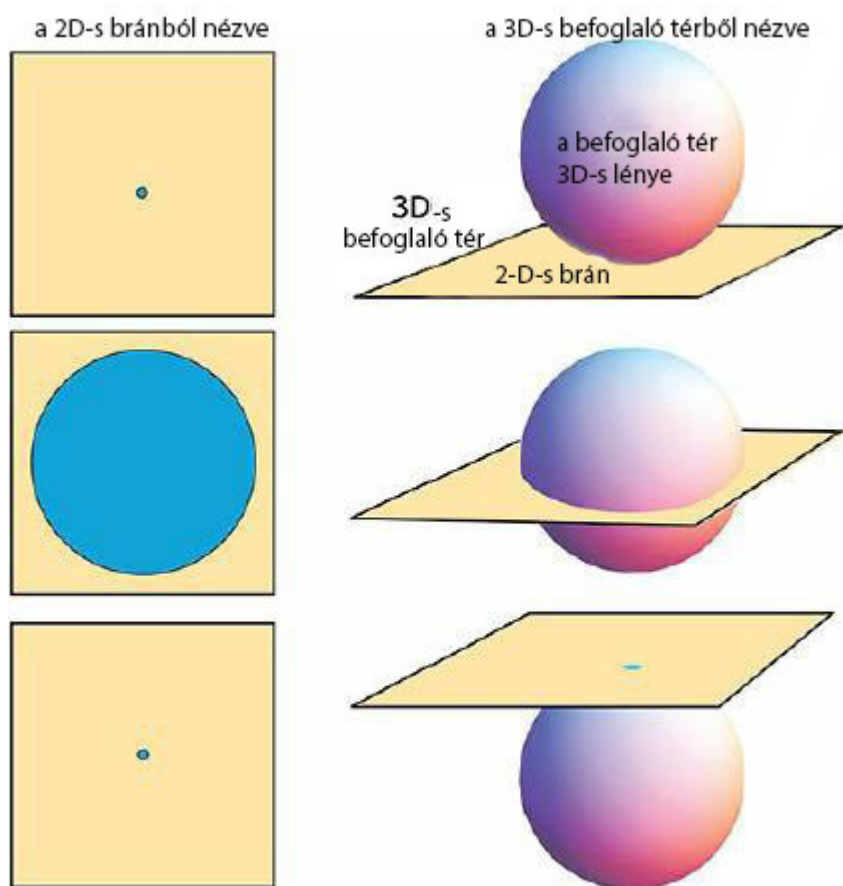
egy napon meglátogatna bennünket egy gömb a 3D-s befoglaló térből. Talán úgy hívnánk, hogy „hipertérlény”.

Elsőre persze nem ismernénk fel, hogy egy ilyen lénnel van dolgunk, sok megfigyelés és gondolkodás után azonban nem látnánk más magyarázatot. Mit is észlelnénk? Hirtelen, minden előjel nélkül, a semmiből egy kék pont jeleink meg a bránunkon (22.2. ábra bal oldala lent). Ezután kék körre tágul, amely a maximális átmérő elérése (bal oldalon középen) után újra ponttá húzódik össze (bal oldalon lent), majd teljesen eltűnik.

Mi azonban hiszünk az anyagmegmaradás elvében. A semmiből nem keletkezhet egyetlen

22.2 ábra.

Egy háromdimenziós gömb áthalad a kétdimenziós bránon



objektum sem, de ez mégis így érkezett. Az egyetlen elképzelhető magyarázatot a 22.2. ábra jobb oldala mutatja. Egy háromdimenziós hiperrérlény - egy gömb - haladt át a bránunkon, miközben mi változó kétdimenziós keresztmetszetét figyelhattuk meg. Ez egy pont volt, amikor a gömb déli pólusa érintkezett a bránunkkal (jobb oldal fent), majd körre tágult, amely maximális átmérőjét akkor érte el, amikor a gömb egyenlítői síkja haladt át rajtunk (jobb oldalon középen). Ezután újra ponttá zsugorodott, amikor az északi pólus érintkezett, majd eltűnt (jobb oldal lent).

Gondoljuk meg, mi történne, ha 2D-s bránunkon egy, a 3D-s befoglaló térben élő 3D-s emberi lény haladna át. Mit láthatnánk?

Az ötödik dimenzió lényének áthatolása 3D-s bránunkon

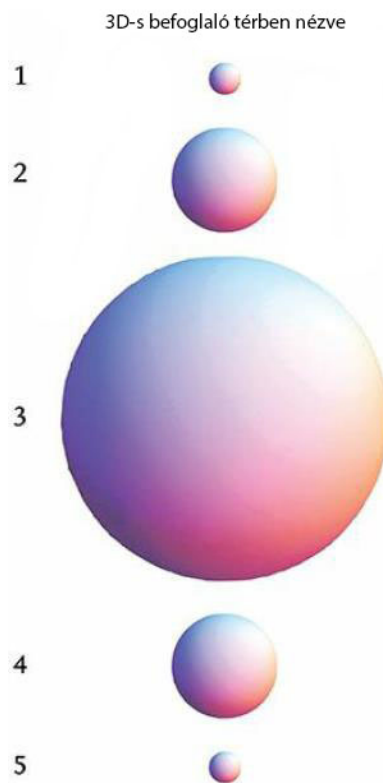
①

Tegyük fel, hogy három tér- és egy idődimenzióval bíró univerzumunk valóban egy ötdimenziós (négy tér- és egy idődimenzió) befoglaló térbe ágyazódik. Tételezzük fel azt is, hogy léteznek a befoglaló térben „hipergömbvények”. Egy ilyen lénynek van középpontja és felszíne, utóbbi azon négydimenziós pontok halmaza, amelyek a középponttól ugyanakkora, rögzített távolságra, mondjuk, 30 centiméterre vannak. A hipertér-lény felszíne három-, belseje pedig négydimenziós lenne.

Gondoljuk el, hogy ez a hipergömbvény saját univerzuma kívülre-vissza dimenziójában utazva áthalad a bránunkon. Mit érzékelhetnénk ebből? A nyilvánvaló feltételezés helyes. A hipergömb szférikus keresztmetszetét látnánk (22.3. ábra).

Először egy pont tűnne elő a semmiből (1), majd háromdimenziós gömbbé tágulna (2), amely legnagyobb átmérőjének elérése (3) után elkezdene összehúzódni (4), hogy ponttá zsugorodva (5) végül eltűnjön.

Ki tudnánk találni, hogy mit láthatnánk, ha egy, a befoglaló térben élő négydimenziós emberi lény haladna át a bránunkon? Ehhez először azt kellene elképzelnünk, hogyan is „nézné ki” a befoglaló térben egy ilyen emberi lény - két lábbal, egy törzssel, két karral, egy fejjel és négy térdimenzióval. Meg azt is, hogy milyen lenne a keresztmetszete...



22. 3. ábra

A hipergömbvény áthaladása a bránunkon, utóbbiból nézve

A hipertér lakóinak természete és a gravitációjuk

MF és S

Ha léteznek hipertérlények, miből lehetnek? Biztosan nem atomokból épülnek fel, mint mi. Az atomoknak három térdimenziójuk van, és csak három térdimenzióban tudnak létezni, nem négyben. Ez igaz a szubatomi részecskékre, de az elektromos és mágneses mezőkre (2. fejezet), valamint az atommagokat összetartó erőkre is.

A legkiválóbb fizikusok dolgoztak annak megértésén, hogy az anyag, a mezők és az erők hogyan viselkednek, ha univerzumunk valóban egy magasabb dimenziós befoglaló térbe ágyazódó brán. A vizsgálatok határozott eredménye, hogy az összes általunk ismert részecske, erő és mező a mi

bránunkra korlátozódik, egyetlen kivétel van csak: a gravitáció és a hozzá kapcsolódó téridőgörbület.

Lehetnek persze másfajta részecskék, mezők és erők, amelyeknek négy térdimenziójuk van, és a befoglaló térhez kötődnek. De ha léteznek is ilyenek, természetükről egyáltalán nem tudunk semmit. Csak találgathatunk. A fizikusok spekulálnak. Nincs azonban semmilyen észlelési vagy kísérleti tapasztalatunk, amely irányíthatná ezeket a találgatásokat. A *Csillagok között*-ben Brand professzor tábláján láthatjuk az ő spekulációit (25. fejezet).

Ésszerű, félig-meddig megalapozott feltételezés, hogy ha léteznek is a hipertér erői, mezői és részecskéi, soha nem leszünk képesek arra, hogy érzékeljük vagy lássuk azokat. Ha egy hipertérlény áthalad a bránunkon, nem fogjuk látni az anyagot, amiből áll. A lény keresztmetszete átlátszó lesz.

Érzékelni és látni fogjuk azonban gravitációs hatását, görbült terét és idejét. Ha például egy hipergömb lény megjelenne a gyomromban, és elég erős gravitációja lenne, a gyomrom valószínűleg görcsbe rándulna, amint izmaim összehúzódná, hogy ellenálljanak a gömbölyű lény középpontja felé irányuló vonzásnak.

Ha egy hipertérlény keresztmetszete megjelenne, majd eltűnne egy színes-kockás szövetdarab előtt, térgörbülete leképezhetné a szövetet, olyan meghajlított képet előállítva, mint amelyet a 22.4. ábra felső részén láthatunk.

Ha a hipertérlény ráadásul forogna is, örvénylő mozgásban magával ragadhatja a teret, amit érzékelhetünk és láthatunk is.

A Csillagok között hipertérlényei



A *Csillagok között* minden szereplője meg van győződve arról, hogy

a hipertérlények léteznek, bár csak ritkán utalnak rájuk. A szereplők általában csak úgy beszélnek róluk, hogy "Ők". Méghozzá tiszteletteljes Ők. Még a film első felében Amelia Brand ezt mondja Coopernek: És akárhik Ők, úgy fest, segíteni akarnak. Az a féreglyuk elvezet más csillagokhoz. Ez pedig épp kapóra jön."

Christopher Nolan egyik szellemes és érdekes ötlete szerint Ők valójában a leszármazottaink: emberek, akik a távoli jövőben szert tettek egy további térdimenzióra, amellyel a befoglaló térben élhetnek. A film vége felé Cooper így szól TARS-hoz: "Még mindig



22.4. ábra.

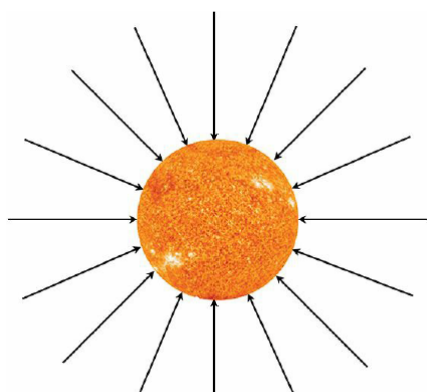
A bránunkon áthaladó hipertérlény meghajlítja és megcsavarja a színes-kockás szövetfal képét.

nem érted, TARS? Ők nem "lények", ők mi vagyunk. Amit én Murphért tettem, ők azt teszik értem." TARS így válaszol: "Emberek nem építhettek ilyet." (Mármint hiperkockát. Cooper ebben lebegett." Nem. Most még nem - mondja Cooper. - De majd egyszer. Nem te meg én. de emberek. Olyan civilizáció, amelyik már túllépett a mi négy dimenziókon."

Cooper. Brand és az *Endurance* legénysége valójában sosem érzékelte vagy látta hipertérbeli leszármazottaink gravitációját, vagy térgörbületüket és örvényeiket. Ez, ha egyáltalán megtörténik, a *Csillagok között* folytatására maradt. Az idősebb Cooper maga azonban, miközben a 30. fejezet zárt hiperkockájában átlebeg a befoglaló téren, eléri az *Endurance* legénységét és fiatalabb önmagát, gravitációsan a hipertéren keresztül. Brand érzi és látja jelenlétét, és azt gondolja, hogy ő Ők.

23. Csapdába ejtett gravitáció

A gravitáció problémája öt dimenzióban



23.1. ábra

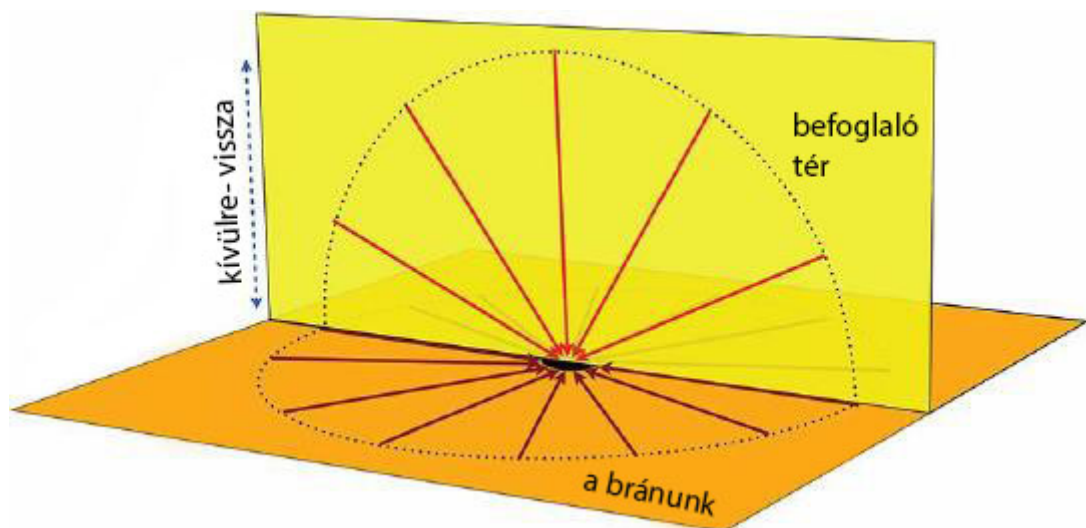
Gravitációs erővonalak a Nap körül

Ha a befoglaló tér létezik, akkor görbültnek kell lennie. Ha nem így lenne, a gravitáció az inverz négyzetes helyett egy inverz köbös törvénynek engedelmeskedne, a Nap pedig nem tudná megtartani bolygóit, a Naprendszer felbomlana.

Na jó, kicsit lassítok, és kifejtem bővebben.

Emlékezzünk rá (2. fejezet), hogy a Nap gravitációs erővonalai, mint a Földé és minden más gömbszimmetrikus testé is, sugárirányúak, a gravitációs vonzóerő pedig ezek mentén a középpont, a Nap felé mutat. Az erő arányos az erővonalak sűrűségével, azzal, hogy hány erővonal halad át egységnyi felületen. Mivel az erővonalak által metszett felületek (gömbök) kétdimenziósak, az erővonal-sűrűség és így a gravitációs erő a távolság négyzetével fordított arányban, azaz $1/r^2$ szerint csökken. Ez a gravitáció *Newton-féle inverz négyzetes törvénye*.

A húrelmélet szerint a befoglaló térben szintén erővonalakkal írható le a gravitáció. Ha a befoglaló tér nem görbült, a Nap gravitációs erővonalai sugárirányban kifelé hatolnak belé



23.2. ábra.

A gravitációs erővonalak sugárirányban hatolnak be a befoglaló térbe, ha az nem görbült. A pontozott körök kizárólag csak a szemünket segítik

(23.2. ábra). A befoglaló tér extra dimenziója (a *Csillagok között*-ben 1) miatt a kettő helyett három olyan dimenzió van, amelyet az erővonalak metszenek. Ezért *ha a befoglaló tér létezik és nem görbült, akkor az erővonalak sűrűségének és így a gravitáció erősségének a Naptól távolodva $1/r^2$ helyett $1/r^3$ szerint kell változnia*. A Nap Földre gyakorolt vonzóereje százszor, a Szaturnuszra kifejtett pedig 2000-szer lenne gyengébb. Ilyen gyorsan csökkenő gravitációs erő esetén a Nap nem lenne képes megtartani bolygóit, azok kirepülnének a csillagközi űrbe.

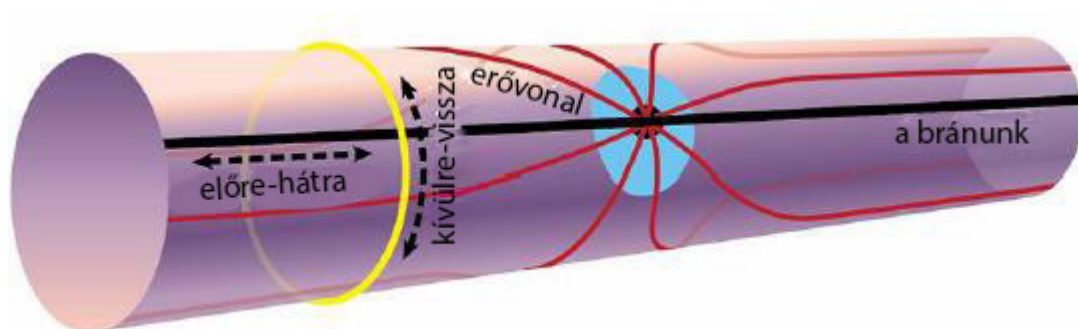
De nem repülnek. Megfigyelt mozgásuk pedig egyértelműen azt mutatja, hogy a Nap gravitációs vonzóereje a távolság négyzetével fordított arányban változik. A következtetés elkerülhetetlen: *ha létezik befoglaló tér, annak úgy kell görbülnie, hogy megakadályozza a gravitáció behatolását az ötödik, kívülre-vissza dimenzióba*.

Felcsavarodott kívülre-vissza?



Ha a kívülre-vissza dimenzió a hengerpalásthhoz hasonlóan *fel van csavarodva*, akkor a gravitáció nem tud messze behatolni a befoglaló térbe, és az inverz négyzetes törvény újra működőképes lesz.

A 23.3. ábra a kék korong középpontjában elhelyezkedő részecske gravitációját mutatja ebben az esetben. Az ábráról két térdimenzió hiányzik. Így bránunknak csak egy dimenzióját (előre-hátra) mutatja a befoglaló tér kívülre-vissza dimenziója mellett. A részecske közelében, a kék



23.3. ábra.

Ha a kívülre-vissza dimenzió [sárga] fel van csavarodva, akkor a kék körön kívül egy részecske gravitációs erővonalai [vörös] párhuzamosak a bránunkkal

korongon belül az erővonalak behatolnak a kívülre-vissza és az előre-hátra dimenzióba is, így (az elhagyott dimenziók visszaállításával) a gravitáció erőssége az inverz köbös törvénynek engedelmeskedik. A kék korongon kívül azonban a felcsavarodásnak köszönhetően az erővonalak párhuzamosak lesznek a bránunkkal. Itt már nem hatolnak be a kívülre-vissza dimenzióba, így a Newton-féle inverz négyzetes törvény újra működik.

A kvantumgravitáció megértésén dolgozó fizikusok szerint egy vagy kettő kivételével ugyanez érvényes minden extra dimenzióra: mikroszkopikus skálákon fel vannak csavarodva, ami megakadályozza a gravitáció túlságosan gyors „szétszóródását”. A *Csillagok között*-ben Christopher Nolan nem foglalkozott a felcsavarodott dimenziókkal, csak egyetlen, nem felcsavarodott befoglaló téri dimenzióra fókuszált. Ez lett az ő ötödik, kívülre-vissza dimenziója.

Miért szükséges, hogy a kívülre-vissza ne legyen felcsavarodva? Chris számára a válasz egyszerű: A felcsavarodott befoglaló tér térfogata nagyon kicsi - távolról sem elegendő, hogy alkalmas legyen egy érdekes sci-fi színterének. Amikor a filmben Cooper a befoglaló térbe hatolt a hiperkockában, annak sokkal nagyobb térfogatúnak kellett lennie, mint amit egy felcsavarodott dimenzió nyújthatott volna.

Kívülre-vissza: anti-de Sitter-görbület



1999-ben Lisa Randall (Princeton University, MIT) és Raman Sundrum (Boston University) egy másik módját találták ki annak, hogy a gravitációs erővonalak ne hatoljanak be a



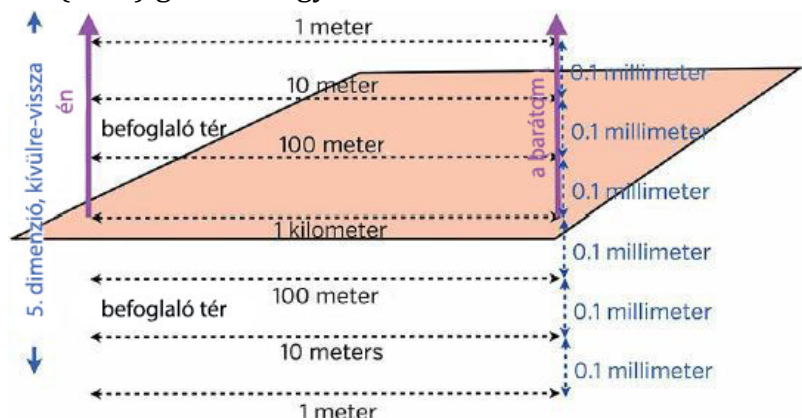
23.4. ábra

Lisa Randall (1962-, jobbra) és Raman Sundrum (1964-, balra)

befoglaló térbe: legyen az ún. „anti-de Sitter-görbületű”. Ezt a görbületet a "hipertérmezők kvantumfluktuációi" okozzák — a történetem szempontjából ennek azonban nincs jelentősége, így itt nem is foglalkozom a magyarázatával⁵⁷. Elégedjünk meg egyelőre annyival, hogy ez a

⁵⁷ A kvantumfluktuációkkal a 26., a hipertérmezőkkel pedig a 25. fejezetben foglalkozom.

mechanizmus a görbület magyarázatának természetes módja. Ezzel ellentétben maga az anti-de Sitter- (AdS-) görbület egyáltalán nem tűnik természetessé. Határozottan természetellenesnek



23.5. ábra.

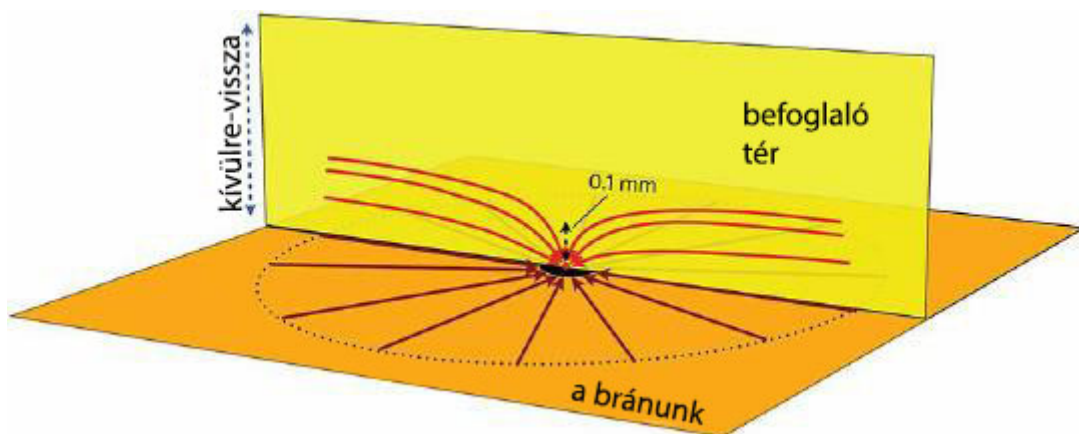
A befoglaló tér AdS-görbülete

néz ki.

Tételezzük fel, hogy mikrobák vagyunk, és egy mikroszkopikus hiperkocka (29. fejezet) felületén élünk. Induljunk el hiperkockánkban a bránunkból merőlegesen kifelé (a 23.5. ábrán egyenesen felfelé). Tegyük fel még azt is, hogy van egy mikrobabarátunk, aki ugyanígy tesz. Bránunk elhagyásakor legyünk 1 kilométer távolságban egymástól. Bár mindketten pontosan kifelé a bránunkra merőlegesen haladunk, az AdS-görbület miatt távolságunk meredeken csökken. Az emberi hajszál vastagságának megfelelő egy tized milliméter megtétele után távolságunk a tizedére.

1 kilométerről 100 méterre csökken. A következő 0,1 milliméter haladás újabb tízszeres csökkenést okoz a távolságban, 10 méterre, a következő 1-re és így tovább.

A bránunkra merőleges távolságsugorodást nagyon nehéz elképzelni. Nem tudok semmilyen jó módszert, a 23.5. ábránál jobbat arra, hogyan lehetne rajzon jól érzékeltetni. Következményei azonban beláthatatlanok. Lehetőséget nyújthat például a fizikai törvények ún. „hierachia-



23.6. ábra.

Ha a befoglaló tér AdS-görbületű, a gravitációs erővonalak bránunkkal párhuzamosan hajolnak, mivel a brántól távol nagyon kicsi a térfogat, amelybe behatolhatnának

problémájának" magyarázatára - ez azonban kívül esik a könyv témáján⁵⁸⁵⁹. Az összehúzódnak miatt a bránunk alatt és felett nagyon kicsiny térfogat van, amelybe a gravitációs erővonalak behatolhatnak (23.6. ábra). Bránunkhoz 0,1 milliméternél közelebb az erővonalak mindhárom merőleges dimenzióba szabadon hatolhatnak be, így a gravitáció erőssége az inverz köbös törvényt követi. 0,1 milliméternél távolabb azonban az erővonalak bránunkkal párhuzamos irányba hajlanak el, ezért csak két merőleges dimenzióba hatolnak be, azaz a gravitáció az inverz négyzetes törvénynek fog engedelmeskedni⁶⁰.

AdS-szendvics: Rengeteg hely a befoglaló térben

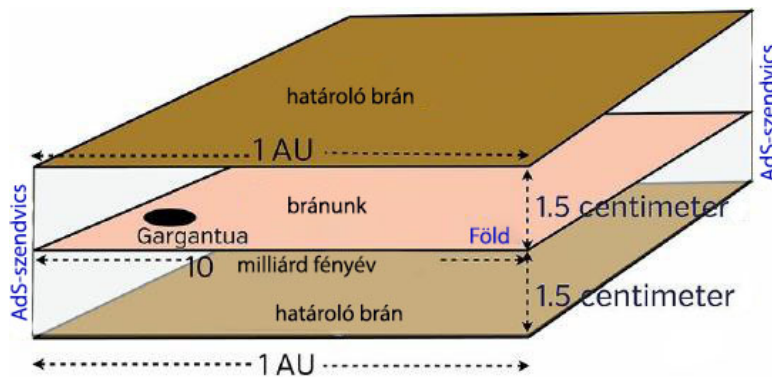


Sajnos kifelé haladva a távolságok bránunkkal párhuzamos irányban történő óriási mértékű összehúzódnak miatt a brán alatt és felett nem marad elegendő hely Cooper számára, hiperkockája pedig túlságosan kicsi bármilyen hipertérbeli emberi aktivitáshoz. Ezt a problémát már 2006-ban telismertem, amikor a *Csillagok között* még csak embrionális állapotban volt, és a film tudományos magyarázatához rögtön ki is találtam egy megoldást rá: Korlátozzuk az AdS-gömbületet egy bránunk körüli vékony rétegre, egy „szendvicsre”. Ezt a miénket körbevevő két másik, ún. „lezáró” brán segítségével tehetjük meg (23.7. ábra). A bránok közötti szendvicsben a befoglaló tér AdS-gömbületű, a szendvicsen kívül azonban sík, azaz nincs gömbülete. Így a szendvicsen kívüli teljes tér rendelkezésre áll a hipertéri kalandokhoz, ennél többet pedig egy sci-fi író nem kívánhat!

⁵⁸ A részleteket lásd Lisa Randall *Warped Passages* (Harper Collins 2006) című könyvében

⁵⁹ A hierarchiaproblémáról és sok más, kapcsolódó érdekességről a *Természet Világa* folyóirat 2000-ben megjelent III. különszámában olvashatunk. (*A fordító megjegyzése*)

⁶⁰ Miért 0,1 milliméter az a mágikus távolság, ahonnan már az inverz négyzetes törvény érvényes, és miért nem 1 kilométer vagy 1 pikométer? A 0,1 millimétert teljesen önkényesen választottam. A kísérletek szerint az inverz négyzetes törvény 0,1 milliméterig biztosan érvényes, ezért ez egy felső határa a mágikus távolságnak, tehát akár sokkal kisebb is lehet.



23.7. ábra.

A két lezáró brán közötti AdS-szendvics.
Az AdS-réteget világos szín jelzi.
 $AU = CSE$

Milyen vastagnak kell lennie a szendvicznek? Elég vastagnak ahhoz, hogy a bránunkból induló gravitációs erővonalakat a bránnal párhuzamos irányúra tudja hajlítani, és így is tudja tartani, aminek következtében a gravitáció az inverz négyzetes törvényt fogja követni. Nem lehet azonban ennél vastagabb, mivel további szélesedés további merőleges összehúzódadást eredményezne, ami viszont gondot okozhatna a hipertéri kalandokban. (Tegyük fel, hogy teljes univerzumunk az AdS-rétegen kívülről nézve mindössze gombos tűfejnyire zsugorodott!) A szükséges vastagság 3 centiméter körüli így a lezáró bránig tartó út alatt a bránunkkal párhuzamos távolságok 15 nagyságrenddel, ezerbilliomod részükre zsugorodnak.

Olvasatomban a Gargantua a megfigyelhető univerzum távoli részén, a Földtől körülbelül 10 milliárd fényév távolságra található. A hiperkockában, a Gargantua centrumából a befoglaló térbe tartva, Cooper áthalad az AdS-rétegen. Itt a Föld távolsága 10 milliárd fényév osztva ezerbillióval, ami körülbelül ugyanakkora, mint a Nap-Föld-távolság, azaz egy csillagászati egység (1 CSE, 23.7. ábra). Cooper tehát 1 csillagászati egység távolságot utazik bránunkkal párhuzamosan a befoglaló térben, hogy elérje a Földet, és meglátogassa Murphöt (lásd a 29.4. ábrát).

VIGYÁZAT: A szendvics instabil!



2006-ban Einstein relativisztikus törvényei alapján dolgoztam ki az AdS-réteg és a lezáró bránok matematikai leírását. Mivel előtte még soha nem foglalkoztam a relativitáselmélettel öt dimenzióban, megkértem Lisa Randallt, hogy nézze át az elemzésemet. Lisa, miután gyorsan átfutotta, jó és rossz hírrrel is szolgált.

A jó hír: Az AdS-szendviccsel kapcsolatos ötletemet már hat évvel korábban felvetette Ruth Gregory (University of Durham, Egyesült Királyság) Valerij Rubakov és Szergej Szibirjakov (Magfizikai Kutatóintézet, Moszkva, Oroszország) társaságában. Azaz a hipertérbe történő első matematikai kalandozásom alkalmával nem csináltam butaságot. Újra felfedeztem valami felfedezésre érdemeset.



23.8. ábra

A széleinél fogva összenyomott kártyalap meggörbül, majd visszahajlik

A rossz hír: Edward Witten (Princeton) és mások kimutatták, hogy az AdS-szendvics *instabil*! A lezáró bránok feszültség alatt állnak, a széleinél fogva hüvelyk- és mutatóujjunk között meggörbített kártyalaphoz hasonlóan (23.8. ábra). A kártyalap behajlik, további összenyomás hatására pedig meggörbül. Hasonlóan, a lezáró bránok is meghajlanak, majd beleütköznek a miénkbe (az univerzumunkba), és szétrombolják azt. Az egész univerzum megsemmisül! A lehető legrosszabb hír!

Több módját is el tudom képzelni azonban univerzumunk megmentésének, ha az valóban egy AdS-szendvicsbe ágyazódik (amit egyébként erősen kétlek), több módját a „lezáró bránok stabilizálásának”, ahogyan azt a fizikus szakzsargonban mondjuk.

Elképzelésem szerint a *Csillagok között*-ben Einstein relativisztikus egyenleteivel dolgozva Brand professzor hozzám hasonlóan szintén felfedezi az AdS-szendvicset, lásd a táblájának képét a 3.6. ábrán. A lezáró bránok stabilitásának problémája összekapcsolódik a professzor gravitációs anomáliák megértésére és ellenőrzésére irányuló erőfeszítéseivel. A filmben ez az igyekezet Brand professzor irodájának tizenhat tábláján bomlik ki matematikai formában (25. fejezet).

Áthaladás az AdS-rétegen



Az AdS-rétegben az ottani térgörbület emberi léptékkal mérve hihetetlen nagyságú árapályerőket okoz. Bármely hipertérleánynek, aki a rétegen keresztül el akarja érni a bránunkat, foglalkoznia kell ezekkel az erőkkel. Mivel semmit sem tudunk arról a négy térdimenzióban kiterjedő anyagról, amelyből egy hipertérleány felépül, arról sincs fogalmunk, hogy egyáltalán tényleg probléma-e ez számára. A tudományos-fantasztikumban a kérdést nyugodtan hagyhatjuk az írókra.

Más a helyzet Cooper esetében, miközben a hiperkockában utazik (29. fejezet). Értelmezésem szerint ugyanis át kell haladnia az AdS-rétegen. Eközben a hiperkockának vagy meg kell védenie a réteg óriási árapályerőitől, vagy el kell tüntetnie az AdS-réteget előle. Máskülönben spagettizálna.

A gravitáció csapdába ejtésével az AdS-réteg szabályozza annak erősségét. A filmben láthatjuk a gravitáció erősségének ingadozását, amelyet vélhetőleg az AdS-rétegben fellépő fluktuációk okoznak. Ezek az ingadozások - gravitációs anomáliák - nagy szerepet játszanak a *Csillagok között*-ben. A következőkben ezekkel foglalkozunk.

24. Gravitációs anomáliák

A *gravitációs anomália* a gravitációval kapcsolatos olyan eltérés, rendellenesség, amely nem illik bele az univerzumról alkotott vagy az azt irányító fizikai törvényekkel kapcsolatos képünkbe - például a könyvek leesése a *Csillagok között-ben*, amit Murph egy szellemnek tulajdonított.

1830 óta a fizikusok jelentős erőfeszítéseket tettek a gravitációs anomáliák felfedezése és a kimutatott néhány eset megértése érdekében. Miért? Azért, mert bármely valódi eltérés tudományos forradalmat eredményezhet: nagy változást abban, hogy mit gondolunk ① Igaznak. Ez eddig háromszor történt meg 1850 óta.

A *Csillagok között-ben* Brand professzor is a megelőző forradalmak szellemében végezte a gravitációs anomáliákkal kapcsolatos kutatásait, így először azokat mutatom be röviden.

A Merkúr-pálya rendellenes precessziója



Newton inverz négyzetes gravitációs törvénye (2. és 23. fejezet) a bolygókat ellipszis alakú pályákra kényszeríti a Nap körül. Minden bolygó érzékeli azonban a többi, a Napéhoz képest persze csekély gravitációs hatását is. Emiatt a pályaellipszisek iránya lassan változik, szakkifejezéssel *processzál*⁶¹.

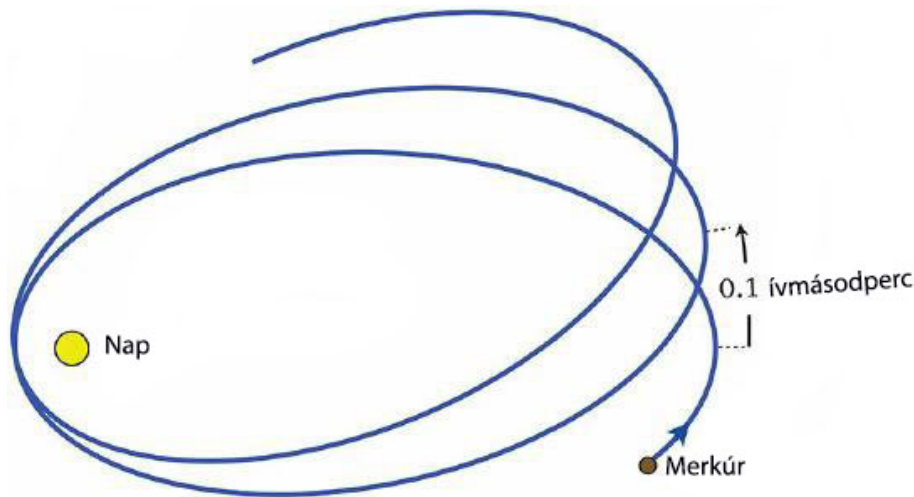
1859-ben a párizsi obszervatórium csillagásza, Urbain Le Verrier bejelentette, hogy anomáliát fedezett fel a Merkúr bolygó pályájában. Amikor kiszámította pályaellipszisének az összes többi bolygó hatására bekövetkező precesszióját, nem megfelelő eredményt kapott. A mért precesszió a Merkúr minden egyes keringése alkalmával mintegy 0,1 ívmásodperccel nagyobb volt, mint amit a többi bolygó perturbációi okozhattak (24.1. ábra).

0.1 ívmásodperc nagyon kicsi szög, a teljes körnek csak tízmilliómod része. A Newton-féle inverz négyzetes gravitációs törvény szerint azonban semmilyen eltérés sem lehetne.

Le Verrier meggyőzte magát arról, hogy az eltérést egy ismeretlen bolygó gravitációs hatása okozza. A Naphoz a Merkúrnál is közelebb keringő bolygónak a „Vulcan” nevet adta.

⁶¹ A pályaellipszis lassú körbefordulása a pályasíkban csak egy megnyilvánulása a többi bolygó gravitációs *perturbáló* (zavaró) hatásának. Valójában arról van szó, hogy a pálya a perturbációk miatt nem zárt. Ennek egy lehetséges modellezése a zártnak gondolt pályagörbe elfordulása. (*A fordító megjegyzése*)

A csillagászok azonban hiába kutattak a Vulcan után. Nem találták sem a bolygót, sem az



24.1. ábra.

A Merkúr pályájának rendellenes precessiója. Az ábrán mind a pálya excentricitását (elnyúltságát), mind a precessió nagyságát jelentősen eltúloztam

anomália egyéb magyarázatát. 1890-re kezdett kikristályosodni a következtetés: a Newton-féle inverz négyzetes törvény nem teljesen pontos.

De milyen értelemben nem az? Kiderült, hogy "forradalmi" értelemben. A pontatlanság okára Einstein jött rá huszomöt évvel később. A görbült idő és tér olyan gravitációs vonzóerővel ruházta fel a Napot, amely a Newton-féle inverz négyzetes törvénynek engedelmeskedik, de csak megközelítően. Nem pontosan.

Miután felismerte, hogy új relativisztikus törvényei megmagyarázzák az észlelt eltérést. Einstein annyira izgatott lett, hogy napokig erős szívdobogása volt, és úgy érezte, mintha valami megpattant volna benne: „Néhány napig szinte önkívületben voltam az örömteli izgalomtól.”

Manapság a mért anomális precessió és az Einstein-törvények előrejelzései egy ezreléken (az anomális precessió egy ezredrészén) belül megegyeznek - ez pedig Einstein nagy diadala!

Galaxisok egymás körüli rendellenes pályái



1933-ban a Caltech csillagásza, Fritz Zwicky bejelentene, hogy hatalmas rendellenességet fedezett fel galaxisok egymás körüli mozgásában. A galaxisok a Coma-halmazban (24.2. ábra) találhatók, amelynek körülbelül ezer tagja van, és mintegy 300 millió fényévre van tőlünk a Coma Berenices (Bereniké Haja) csillagkép irányában.

A galaxisok színképvonalainak Doppler-eltolódásából Zwicky meg tudta becsülni, hogy azok mekkora sebességgel mozognak egymáshoz képest. Az egyes objektumok fényességéből pedig a

tömegükre, ezáltal más galaxisokra gyakorolt gravitációs vonzóerejükre tudott következtetni. A mozgásuk azonban olyan gyors volt, hogy a gravitáció semmiképpen nem tudta volna együtt tartani a halmaztagokat. Az univerzumra és a gravitációra vonatkozó akkori legjobb tudásunk szerint a halmaznak rövid időn belül teljesen szét kell esnie. Ez esetben viszont csak rövid időre állhatott össze a tagok véletlenszerű mozgásának eredményeként, és egyéb csillagászati jelenségekkel összehasonlítva ugyanilyen gyorsan - szinte egy szempillantás alatt - meg is kell szűnnie.

Ez a következtetés teljesen valószínűtlennek tűnt Zwicky számára. Valami hibádzott a hagyományos okoskodásunkkal. Zwicky egy megalapozott sejtéssel állt elő: A Coma-halmazt egyfajta „sötét anyag” tölti ki, amelynek gravitációs hatása elég nagy ahhoz, hogy összetartsa a halmazt.

24.2. ábra.

A Coma-galaxishalmaz óriástávcsővel készült képe



A csillagászok és fizikusok által felfedezett sok rendellenesség önmagától megoldódik a megfigyelési technikák fejlődésével. Ez esetben azonban nem így történt. Sőt a probléma csak fokozódott. Az 1970-es évekre nyilvánvalóvá vált, hogy az ún. sötét anyag minden galaxishalmazt, de még az egyedi galaxisokat is áthatja. A 2000-es évekre pedig az is egyértelmű lett, hogy a sötét anyag gravitációs-lencse-hatása leképezi a még távolabbi galaxisokat (24.3. ábra), pontosan úgy, ahogyan a Gargantua gravitációs tere alkot képet a csillagokról (8. fejezet). Manapság a lencsehatást az univerzum sötét anyagának feltérképezésére használjuk.

Mi a fizikusok abban is teljesen biztosak, hogy a sötét anyag ideaja valóban forradalmi elképzelés, és az korábban soha nem látott típusú részecskékből áll, amely típus létezését viszont a kvantumfizikai törvények előre jelzik. A fizikusok nekiálltak a Szent Grál keresésének, annak, hogy detektálják a sötét anyag Földünkön gyakorlatilag kölcsönhatás nélkül áthatoló részecskéjét, és megmérjék a tulajdonságait.

Az univerzum rendellenesen gyorsuló tágulása



1998-ban egymástól függetlenül két kutatócsoport is meghökkentő rendellenességet fedezett fel az univerzum tágulásában. A felismerésért a csoportok vezetői, Saul Perlmutter és Adam Riess (University of California, Berkeley), valamint Brian Schmidt (Australian National University) elnyerték a 2011-es fizikai Nobel-díjat.



24.3. ábra.

Az Abell 2218 katalógusjelű galaxishalmazban található sötét anyag gravitációs-lencse-hatása leképezi a sokkal távolabbi galaxisokat. A lencsézett galaxisok képe ív alakú [ilyenek például a rózsaszínnel bekarikázottak], hasonlóan a Gargantua gravitációs lencséje által létrehozott struktúrákhoz, lásd a 8. fejezetben.

Mindkét kutatócsoport szupernóva-robbanásokat vizsgált, mégpedig olyan típusúakat, amelyekhez az vezet, hogy nagy tömegű csillagok kifogynak nukleáris üzemanyagukból és neutroncsillagokká roskadnak össze, miközben a robbanás energiája a csillag külső rétegeit lefújja. Perlmutterék azt vették észre, hogy a távoli szupernóva-robbanások halványabbak, azaz messzebb voltak a vártnál. Ez pedig azt jelenti, hogy az univerzumnak a múltban lassabban kellett tágulnia, mint ma: a tágulás gyorsul (24.4. ábra).

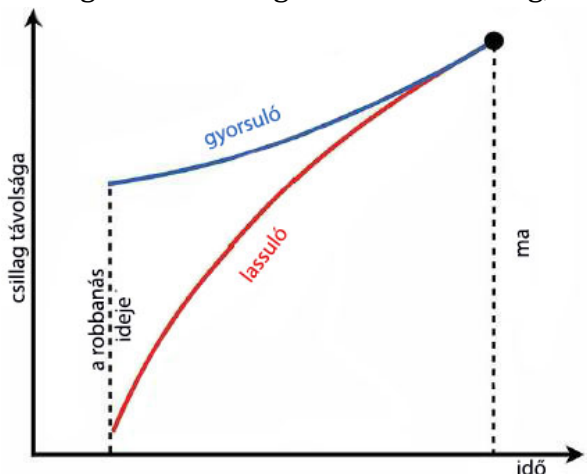
A gravitációra és az univerzumra vonatkozó jelenlegi tudásunk szerint a világegyetemben minden dolog (csillagok, galaxisok, galaxishalmazok, sötét anyag stb.) gravitációs vonzóerőt gyakorol minden másra. Ennek következtében pedig az univerzum tágulásának lassulnia kellene, nem pedig gyorsulnia.

Ezen oknál fogva én magam nem is hittem a vélt gyorsuló tanulásban, mint ahogyan sok más csillagász és fizikus kollegám sem, amíg más, teljesen eltérő módszereken alapuló észlelések meg nem erősítették azt. Akkor viszont beadtuk a derekunkat.

Miről is van szó? Két lehetőség áll előttünk: Vagy valami nem stimmel a gravitáció Einstein-féle relativisztikus törvényeivel, vagy a közönséges és sötét anyagon kívül valami még van az univerzumban. Valami, ami hatástalanítja a gravitációt.

A legtöbb fizikus mélyen hisz az einsteini relativisztikus törvényekben és gyűlölné, ha kellene adni azokat a taszítás magyarázatához. A hipotetikus taszító valami az ún. „sötét energia”.

A végső döntés még nem született meg, de ha az anomália oka valóban a sötét energia (bármilyen is az), akkor a gravitációs megfigyelések szerint az univerzum 68 százaléka sötét energia, 27 százaléka sötét anyag, és csak 5 százaléka az a közönséges anyag, amiből mi, a bolygók, a csillagok és a galaxisok is állnak.



24.4. ábra.

Szupernóvák távolsága a robbanás pillanatában [akkor, amikor a detektált fény elindult], két feltételezés mellett: az univerzum tágulása lassul [vörös], illetve a tágulás gyorsul [kék]. A robbanások a vártnál halványabbak, azaz távolabb történtek, így a tágulásnak gyorsulnia kell.

legyen is az), akkor a gravitációs megfigyelések szerint az univerzum 68 százaléka sötét energia, 27 százaléka sötét anyag, és csak 5 százaléka az a közönséges anyag, amiből mi, a bolygók, a csillagok és a galaxisok is állnak.

A fizikusoknak lett tehát egy újabb Gráljuk: annak tisztázása, hogy az univerzum gyorsuló tágulásának oka vajon az Einstein-féle relativisztikus törvények sérülése (ha így van, akkor mi azok helyes alakja?), vagy a sötét energia taszítása (ez esetben pedig mi a sötét energia természete?).

Gravitációs anomáliák a Csillagok között-ben

A Csillagok között gravitációs anomáliái - ellentétben az előzőekben leírt másik hárommal - a Földön kimutathatók.

A fizikusok az 1600-as évek végétől, Isaac Newtontól kezdve rengeteg energiát fektettek ezen anomáliák keresésébe. A kutatások sok rendellenességet tártak fel, de az alaposabb vizsgálatok során egyik sem bizonyult valósnak.

A Csillagok között anomáliáit furcsaságuk, erősségük és időbeli változásuk teszi meglepővé. Ha bármi hasonló a 20. században vagy a 21. század elején tűnt volna fel, a fizikusok minden bizonnyal felfigyeltek volna rá és nagy buzgalommal kezdték volna vizsgálni. A Csillagok között korára a Föld gravitációja valamiképpen megváltozott.

A filmben Romilly csakugyan ezt mondja Coopernek: „Már majdnem ötven éve, hogy észlelni kezdtünk gravitációs anomáliákat [a Földön].” És nagyjából szintén ugyanebben az időben a legjelentősebb rendellenességet mind között: egy féregjárat váratlan megjelenését a Szaturnusz mellett, ott, ahol előzőleg semmi sem volt.

A film nyitójelenetében Cooper maga is megtapasztal egy anomáliát, amikor megpróbál leszállni a Ranger űrhajóval. „Igen, az Egyenesnél. Valami blokkolta a vezérlőrendszert” - mondja Romillynek.

A Cooper által a kombájnok vezérlésére beépített GPS rendszer is megbolondult, miközben a gépek a kukoricatáblákon dolgoztak, és mindegyik elindult a farmon lévő háza felé. A hibát gravitációs anomáliáknak tulajdonítja, amelyek elrontották a GPS rendszerek működéséhez szükséges gravitációs korrekciókat (4.2. ábra).

A film elején láthatjuk Murphöt, amint dermedten bámulja a természetellenes gyorsasággal szobája padlójára hulló és ott vastag, vonalkódszerű mintázatba rendeződő port. Majd látjuk, ahogyan Cooper vizsgálja a vonalakat (24.5. ábra), egy pénzérmét hajít el az egyik mentén, az pedig a padlóra csapódik.

Feltételezem, hogy Brand professzor és munkatársai rengeteg adatot gyűjtöttek össze az anomáliákról. Fizikusként számomra - és véleményem szerint Brand professzor számára is - legérdekesebb az *árapályerők* új és változó mintázata.

Az árapályerőkkel először a 4. fejezetben találkoztunk, mégpedig egy fekete lyukéval, illetve a Holdnak és a Napnak Földre gyakorolt hatásával. A 17. fejezetben Miller bolygóján működés közben is láttuk a Gargantua árapályerejét, amint gigantikus „millerrengéseket”, szökőárakat és dagályhullámokat okozott. A 16. fejezetben pedig gravitációs hullámok formájában találkoztunk az árapályerők kicsiny tértorzító hatásával.

Árapályerőket nemcsak fekete lyukak, a Nap, a Hold és a gravitációs hullámok okoznak, hanem



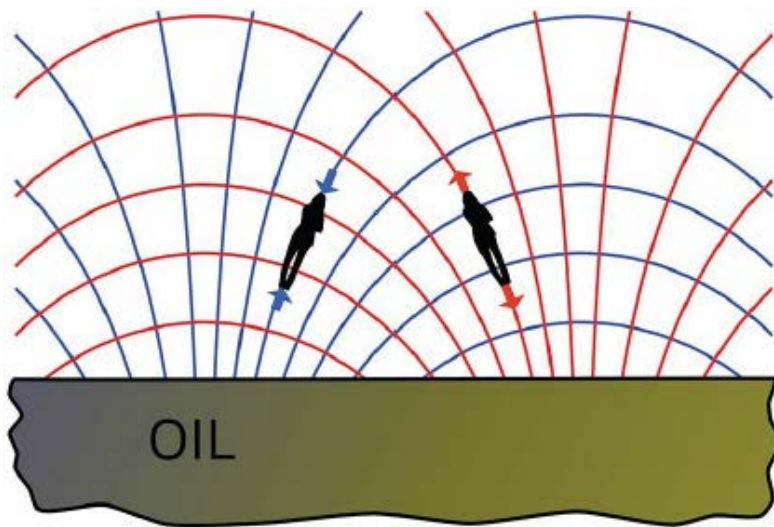
24.5. ábra

Cooper a por mintázatait figyeli Murph hálószobájának padlóján.

természetesen minden gravitáló objektum. Például a földkéreg olajat tartalmazó részei kisebb sűrűségűek, mint a környező, csak kőzetekből álló tartományok, így gravitációs vonzásuk is kisebb. Ezért az árapályerők mintázata is sajátosan alakul.

A 24.6. ábrán a tendex-vonalakat használom ennek illusztrálására, (Ezekkel kapcsolatban lásd a 4. fejezetet.) Az összenyomó tendex-vonalak (kézzel rajzolva) az olajat hordozó területből, míg a nyújtó tendex-vonalak (vörössel rajzolva) a sűrűbb, olajmentes régióból indulnak. Mint mindig, a kétfajta vonalcsalád merőleges egymásra.

Az árapálymintázatokat a gravitációs gradiométernek nevezett műszerrel lehet kimérni (24.7. ábra), amely két, egymást keresztező, torziós rugóhoz kapcsolódó tömör rúdból áll. Mindkét rúd

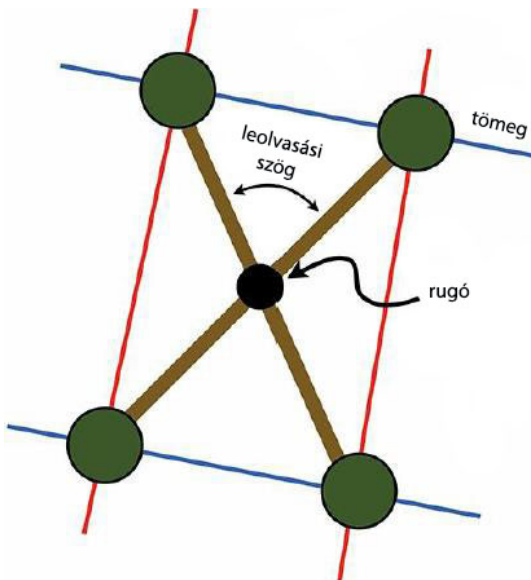


24.6. ábra.

Tendex-vonalak a földkéreg egy része felett. A vörös vonalak önmaguk mentén nyújtanak, a kékék pedig összenyomnak.

végein a gravitációt érzékelő tömegek vannak. A rudak alapesetben egymásra merőlegesek, az ábrán azonban a kék tendex-vonalak a felső és az alsó tömegek párait is egy más felé nyomják, a vörös tendex-

vonalak pedig távolítják egymástól a jobb és bal oldali párok tagjait. Ennek eredményeként a rudak által bezárt szög csökken, egészen addig, amíg a rugóban ébredő erő nem ellensúlyozza az árapályerőket. Ez a gradiométer által mért érték, a „leolvasási szög”.



24.7. ábra.

A Robert Forward (Hughes Research Laborator.es) által 1970-ben tervezett és épített egyszerű gravitációs gradiométer

Ha a gradiométert átvisszük a 24.6. ábra árapálmintázatán, a leolvasási szög az olajat tartalmazó réteg felett megnő, majd újra csökken az olajmentes rész felett. Ehhez hasonló, de ennél kifinomultabb gradiométereket használnak a geológusok az olaj és az ásványi anyagok felkutatására⁶².

A NASA GRACE nevű, még sokkal kifinomultabb gradiométere (24.8. ábra) a világűrből térképezi fel a földi gravitációs anomáliákat, például a jégmezők elolvadása által okozott változásokat⁶³.

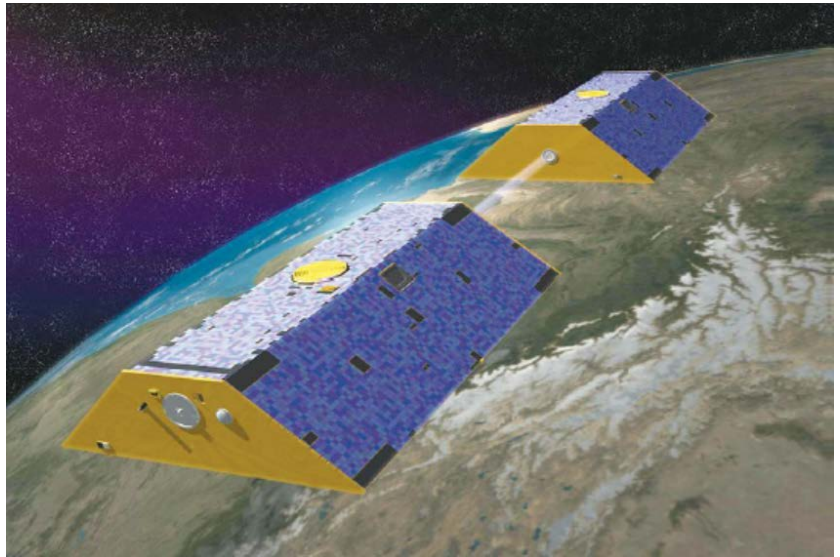
⁶² Az eljárás alap gondolata és első megvalósítása Eötvös Loránd nevéhez fűződik, aki a Vas megyei Ság-hegyen (is) végezte híres méréseit. *(A fordító megjegyzése)*

⁶³ A Gravity Recovery and Climate Experiment amerikai-német űreszközt 2002 májusában bocsátották fel, és még 2014-ben is gyűjti az adatokat.

Olvasatomban a Brand professzor és munkatársai által mért gravitációs anomáliák többsége a földfelszín feletti tendex-vonalak mintázatában nyilvánvaló ok nélkül bekövetkező hirtelen és

24.8. ábra

GRACE: Két, egymást mikrohullámnyaláb segítségével követő műhold, amelyeket a Föld - képen nem ábrázolt- kék tendex-vonalai egymás felé tolnak, a vörösek pedig távolítani igyekeznek.



váratlan változás. A földkéreg kőzetei és az olaj nem mozognak, a jégtáblák olvadása pedig túlságosan lassú folyamat ilyen gyors változások előidézéséhez. Új gravitáló tömegek sem jelentek meg a gradiomérerek közelében. Azok mégis jelzik a változó árapálymintázatot. A hulló por vonalak mentén gyűlik össze. Cooper pedig látja a padlóra csapódó pénzérmét.

Brand professzor csapatának tagjai figyelemmel kísérik ezeket a változó mintázatokat, és buzgón rögzítik Cooper észleléseit. Az általuk összegyűjtött adatok képezik a professzor gravitáció megértését célzó, az egyenletére koncentráló kutatásának alapjait.

25. A professzor egyenlete



A *Csillagok között*-ben a gravitációs anomáliák két okból is foglalkoztatják Brand professzort. Ha rá tudna jönni, hogy mi okozza azokat, az olyan forradalmi változást hozna a gravitációval kapcsolatos tudásunkban, amely csak Einstein relativisztikus törvényeinek hatásához mérhető. Ami azonban talán még ennél is fontosabb: Ha arra is rájönne, hogyan lehet befolyásolni ezeket az anomáliákat, az lehetővé tehetné a NASA számára, hogy emberek egész kolóniáit juttassa a haldokló Földről a világűrbe, és elindítsa őket az univerzum egy más részében található új otthonuk felé.

A professzor számára az anomáliák megértéséhez és ellenőrzéséhez a táblájára írt egyenlete jelenti a kulcsot (25.7. ábra, e fejezet vége felé). A filmben ő és Murph együtt próbálkoznak az egyenlet megoldásával.

Murph és a professzor jegyzetfüzetei - és a tábla

A film forgatásának megkezdése előtt a Caltech két tehetséges fizikushallgatója a professzor egyenletével kapcsolatos számításokkal írt tele két jegyzetfüzetet. Elena Murchikova egy új, üres füzetet töltött meg a felnőtt Murph gyöngybetűkkel írt kalkulációival, míg Keith Matthews egy elnyűtt, öreg jegyzetfüzetet Brand professzor számításaival, annyira hanyag kézírással, amilyen az olyan vén fickókra jellemző, mint a professzor és én.

A filmben a Jessica Chastain által játszott felnőtt Murph a jegyzetfüzetébe írt matematikai részleteket a Michael Caine által alakított professzorral vitatja meg. Elena Murchikova, a kvantumgravitáció és a kozmológia szakértője a forgatáson tanácsokkal látta el Chastaint a dialógusait, a jegyzetfüzetét és a táblára írt dolgokat illetően. Érdekes volt együtt látni a két, teljesen különböző világból érkezett vörös hajú, ragyogó, gyönyörű nőt.

Ami engem illet, én Brand professzor tábláját töltöttem meg diagramokkal és matematikával (25.8. ábra, alább), beleértve a professzor egyenletét is - AZ egyenletet -, természetesen Christopher Nolan kívánságának megfelelően. Nagy örömet leltem a Michael Caine-nel való beszélgetésben, aki az általa megformált professzor prototípusaként tekinthetett rám. És nagy örömmel figyeltem Christ, szakmájának kiváló mesterét, amint pontosan abban a formában veszi fel a jeleneteket, ahogyan azt eltervezte.

Néhány héttel a professzor irodájában játszódó jelenetek felvétele előtt Chris és én alaposan megtárgyaltuk, hogy milyen legyen AZ egyenlet. (Az 1. fejezet 1.2. ábráján Chris éppen egy, az



25.1. ábra.

A professzort alakító Michael Caine és én a forgatáson a professzor irodájában.

egyenlettel kapcsolatos papírt tart a kezében.) Íme a kicsit bő lére eresztett tudományos magyarázata annak, mire jutottunk. A film történetének háttere - ahogyan én gondolom.

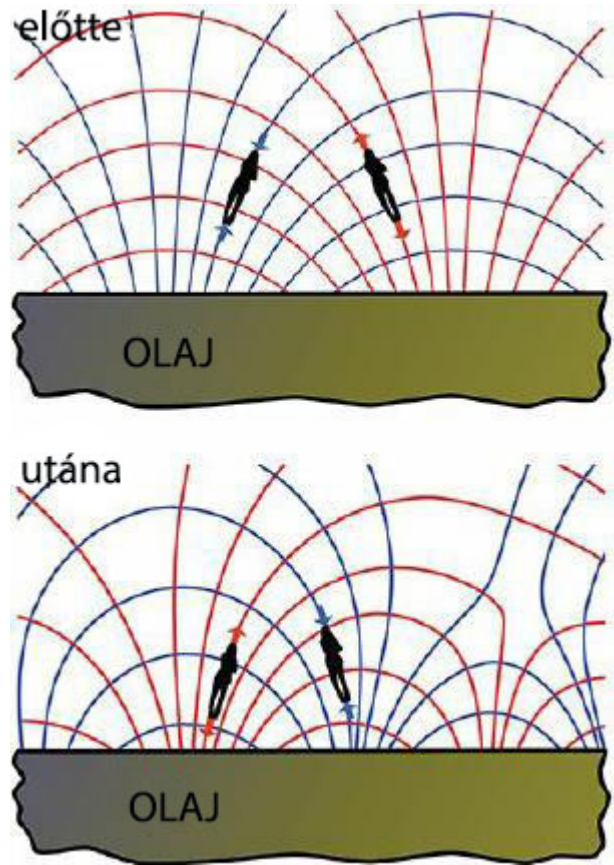
Az anomáliák forrása - Az ötödik dimenzió

Úgy képzelem, nem tartott sokáig, hogy a professzor meggyőzze magát, a rendellenességek forrása az ötödik dimenzió, az ötödik dimenzió, a befoglaló tér gravitációja. Miért?

Az árapályerőkben bekövetkező hirtelen változásoknak nincs látható oka négydimenziós univerzumunkban. Háttértörténetemben például a professzor csapata egy olajcsapda felett tapasztalja, hogy az árapályerők mindössze néhány perc alatt a várt mintázatból (25.2. ábra felső képe) egy teljesen különbözőbe (25.2. ábra alsó kép) váltanak. Az olaj nem mozdult el, a kőzetek nem csúsztak el. Négydimenziós világunkban semmi nem változott az árapályerőkön kívül. A hirtelen változásoknak muszáj, hogy legyen forrásuk. Ha ez nem a mi univerzumunkban, a mi bránunkon van, akkor a professzor gondolatmenete szerint csakis egy helyen lehet: a befoglaló térben.

25.2. ábra.

Az árapályerőket jellemző tendex-vonalak (4. fejezet) egy olajcsapda felett a hirtelen változás előtt és utána.



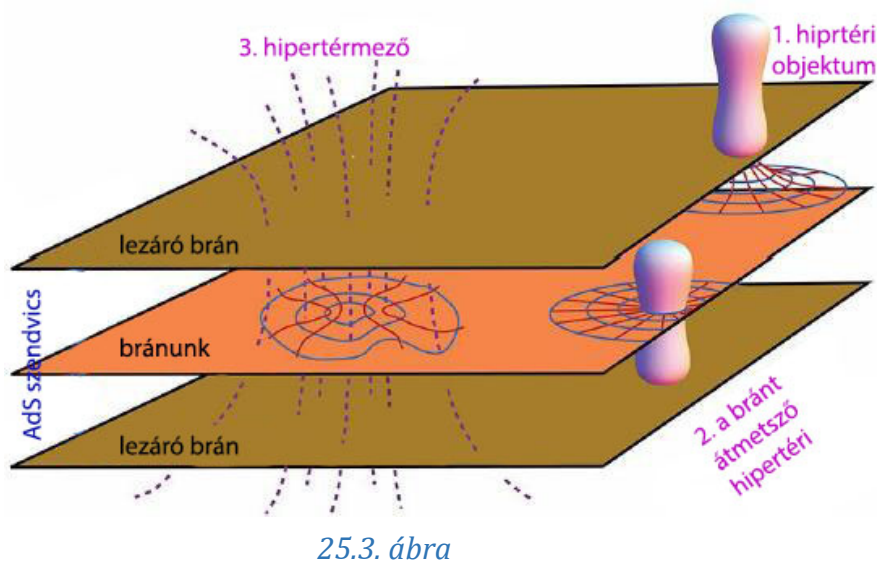
Történetemben a professzor három módját tudja elképzelni annak, hogyan okozhatja az anomáliákat valami a befoglaló térben, az első kettőt azonban gyorsan el is veti:

1. A befoglaló tér objektumai - talán egy élőlény, egy hipertérleány - megközelíti a bránunkat, de nem hatol át azon (25.3. ábra, jobb oldalon fent). Az objektum gravitációja a befoglaló tér minden dimenziójában hat, így behatol a bránunkba is. Az azt körülvevő AdS-réteg (23. fejezet) azonban bránunkkal párhuzamos irányba kényszeríti az objektum tendex-vonalait, csak egy parányi részüket engedve a bránunkba. Ezt a professzor elvetette.

2. A bránunkon áthatoló hipertéri objektum a mozgása miatt változó árapályerőket generál (25.3. ábra, jobb oldalon középen). Azonban a változó gravitáció professzorék által észlelt mintázatainak többsége nem illeszkedik ehhez a magyarázathoz. A tendex-vonalak sokkal diffúzabbnak tűnnek annál, mint ami egy lokalizált objektumtól várható lenne. Néhány anomáliát magyarázhatnak ilyen objektumok, a többség azonban egyéb indokot igényel.

3. A változó árapályerőket a bránunkon áthatoló hipertérmezők okozhatják (25.3. ábra, bal oldalon lent). A professzor szerint - és szerintem is - ez a legvalószínűbb magyarázat az anomáliák többségére.

Mi az „hipertérmező”? A fizikusok a *mező* kifejezést olyasvalamire használják, ami kitölti a teret, és erőhatást gyakorol azokra a dolgokra, amelyek megközelítik. Több példával is találkoztunk már



25.3. ábra
Három módja annak, hogy a befoglaló tér miként okozhatja az észlelt gravitációs anomáliákat. A vörös és a kék vonalak egy hipertéri objektum vagy mező tendex-vonalai.

az univerzumunkban, a bránunkban létező mezőkre: A 2. fejezetben a mágneses mezőkkel (mágneses erővonalak együttese), az elektromos mezőkkel (elektromos erővonalak együttese) és a gravitációs mezőkkel (gravitációs erővonalak együttese), a 4. fejezetben pedig az árapály mezőkkel (a nyújtó és összenyomó tendex-vonalak együttese).

A hipertérmező azon erővonalak összessége, amelyek az ötdimenziós befoglaló térben húzódnak. A professzor nem tudja, hogy milyen típusú erővonalakról lehet szó, de van sejtése, lásd alább. A 25.3. ábra egy bránunkon áthatoló hipertérmezőt mutat (szaggatott bíborszínű vonalak). Ez a hipertérmező árapályerőket generál a bránunkban (vörös és kék tendex-vonalak). Ha változik a mező, változik a legtöbb anomáliáért felelős (legalábbis a professzor így véli) árapályhatása is.

Nem ezt gondolja azonban a hipertérmezők egyedüli szerepének - legalábbis az én olvasatomban. Azok meghatározhatják a bránunkban létező objektumok, például a bolygók gravitációjának erősségét is.

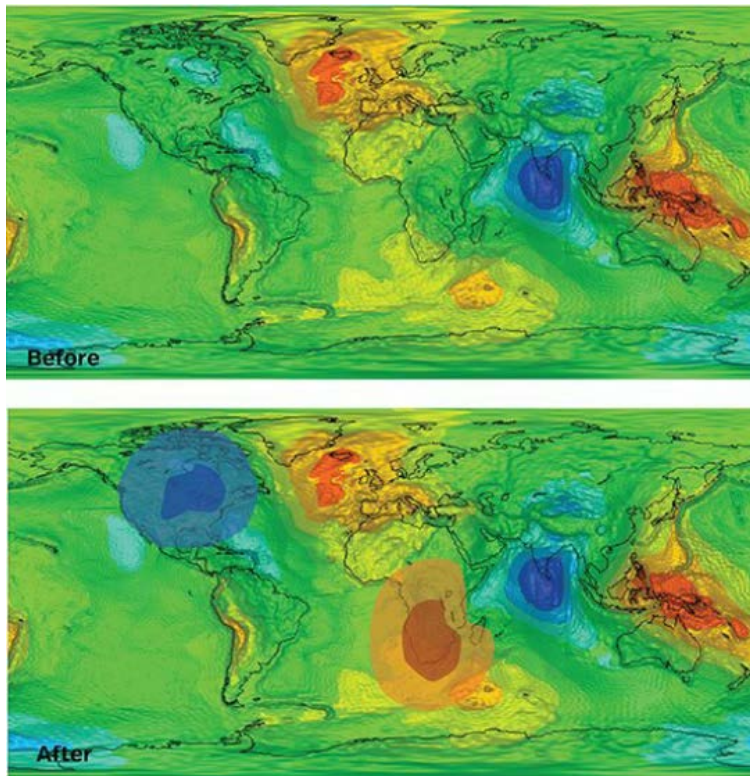
Hipertérmezők határozzák meg a gravitáció erősségét

Bránunk bármely kicsiny anyagdarabkájának gravitációs hatása nagy pontossággal engedelmeskedik a Newton-féle inverz négyzetes törvénynek (2. és 23. fejezet): gravitációs vonzóereje $g = Gm/r^2$ alakban írható fel, ahol r az m tömegű anyagdarabtól mért távolság, G pedig a Newton-féle gravitációs állandó. A G szabja meg a gravitációs vonzás általános erősségét.

A gravitáció törvényeinek sokkal pontosabb, Einstein-féle relativisztikus változatában a gravitáció erőssége, valamint a tér és idő anyag által okozott görbülete szintén a G -vel arányos.

Ha nincs befoglaló tér - azaz csak a mi négydimenziós univerzumunk létezik akkor Einstein relativisztikus törvényei szerint a G abszolút állandó. Térben mindenütt ugyanaz, és nem változik az idővel sem.

Ha azonban *létezik* a befoglaló tér, akkor a relativisztikus törvények megengedik a G változását. A professzor úgy véli, a változást *talán* a hipertérmezők kontrollálhatják, és



25.4. ábra

A Föld gravitációs terének térképe Fent: A GOCE műhold 2014-es mérése. Lent: Az anomália korszakában a hirtelen változás után.

valószínűleg befolyásolják is. Az egyik észlelt rendellenességre (25.4. ábra) a film történetének általam kiegészített változatában ez a legjobb magyarázat.

A Föld gravitációs vonzásának erőssége helyről helyre változik a kőzetek, az olaj, az óceánok és a légkör változó sűrűsége miatt. A Föld körül keringő műholdak fel is térképezték ezt. 2014-ben a legpontosabb gravitációs térkép az Európai Űrügynökség (Esa) GOCE⁶⁴ műholdjának mérésein alapul. 2014-ben a Föld gravitációja Dél-Indiában a leggyengébb, Izlandon és Indonéziában pedig a legerősebb.

Szerintem ez a térkép nem változott számottevő mértékben egészen addig, amíg az anomáliák elkezdtek megjelenni. Egy napon Észak-Amerikában a gravitáció hirtelen kicsit gyengült, Dél-Afrikában pedig erősödött.

⁶⁴ Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer, GOCE

Brand professzor a hipertérmezők által okozott árapályerőkkel próbálta magyarázni a változást, de nehézségekbe ütközött. A legjobb magyarázat, amit el tudott képzelni, hogy a G gravitációs állandó a Föld belsejében Dél-Afrika alatt megnőtt, Észak-Amerika alatt pedig csökkent. A Dél-Afrika alatti kőzetek vonzása hirtelen sokkal nagyobb lett, az Észak-Amerika alatt elhelyezkedőké pedig sokkal kisebb! Szerinte ezeket a változásokat a bránunkon áthatoló és a G értékét befolyásoló hipertérmezők okozták.

Az én történetemben Brand professzor úgy gondolja, hogy a hipertérmezők *nemcsak* a földi gravitációs anomáliák megértéséhez szolgáltatnak kulcsot, de két további fontos szerepet is betöltenek: Nyitva tartják a féregjáratot, és megóvják univerzumunkat a pusztulástól.

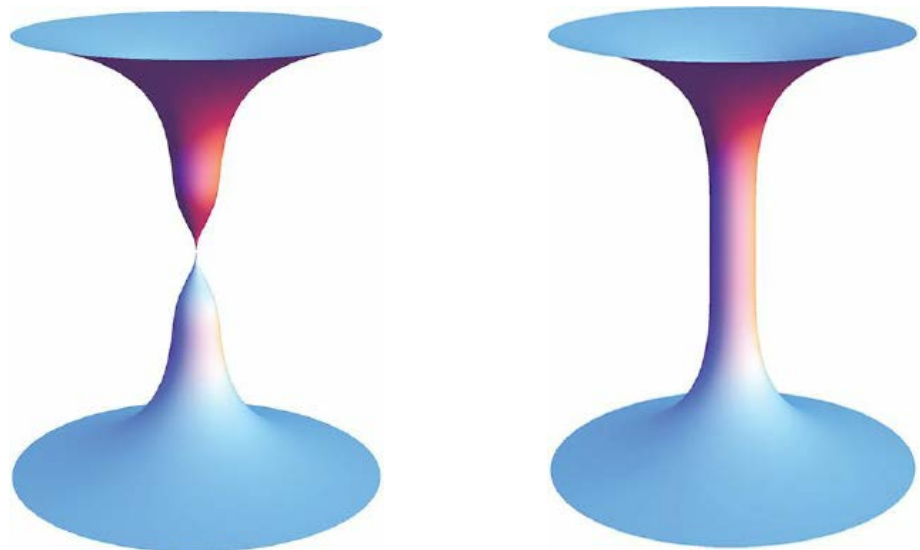
A féregjárat nyitva tartása

A Naprendszerünket a Gargantua környezetével összekötő féregjárat külső segítség nélkül szétszakadna, így megszűnne a kapcsolat a Gargantuához. Ez egyértelmű következménye Einstein relativisztikus törvényeinek (14. fejezet).

Ha *nincs* befoglaló tér, akkor a féregjárat nyitva tartásának egyetlen módja, hogy gravitációsan taszító egzotikus anyaggal töltsük meg. Az univerzumunk gyorsuló tágulását vélhetően okozó sötét

25.5. ábra.

A féregjárat. Balra: Szétszakadva. Jobbra: A hipertérmezők által nyitva tartva



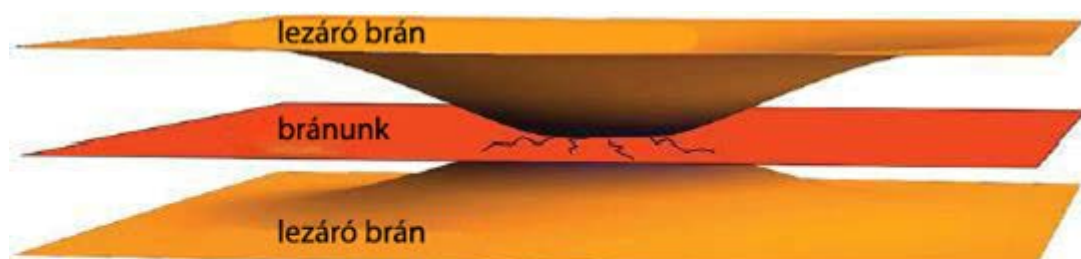
energia taszító hatása valószínűleg nem elég ehhez. A tudomány 2014-es állása szerint a kvantumfizika törvényei még egy rendkívül fejlett civilizáció számára sem tennék lehetővé, hogy valaha is a féregjárat nyitva tartásához elegendő mennyiségű egzotikus anyagot gyűjtsön össze. Úgy vélem, ez a következtetés Brand professzor korában még nyilvánvalóbb.

Van azonban egy alternatíva, amelyet Brand professzor szerintem felismer. A hipertérmezők elvégezhetik a feladatot, nyitva tarthatják a féregjáratot. Mivel a professzor véleménye szerint a

féreglyukat hipertérleányek hozták létre, és helyezték a Szaturnusz közelébe, számára természetes magyarázatnak tűnik az, hogy nyitva tartását hipertérmezőkkel oldják meg.

Univerzumunk megóvása a pusztulástól

Ahhoz, hogy univerzumunkban a gravitáció nagy pontossággal kövesse a Newton-féle inverz négyzetes törvényt, bránunknak két lezáró brán között kell elhelyezkednie, köztük pedig AdS-görbületnek kell lennie (23. fejezet). A lezáró bránok azonban feszültség⁶⁵ alatt állnak és hajlamosak a meggömbülésre, mint a két ujjunk közé fogott és összenyomott kártyalap (23.8. ábra). Ez szintén a befoglaló térre és a bránokra alkalmazott relativisztikus Einstein-törvények egyértelmű jóslata.



25.6. ábra.

Bránütközés

Ha a meggömbülést nem ellensúlyozza valami, a lezáró bránok beleütköznek a miénkbe - az univerzumunkba (25.6. ábra)⁶⁶. Világunk megsemmisül!

Nyilvánvaló, hogy univerzumunk nem pusztult el. Valaminek tehát meg kell akadályoznia a lezáró bránok meggömbülését. Brand professzor ismét csak egyetlen dologra tud gondolni, ami elvégzi ezt a feladatot: a hipertérmezők. Ha egy lezáró brán elkezd meghajolni, a hipertérmezőknek valamilyen módon hatást kell gyakorolniuk rá. visszanyomva a megfelelő, sík állapotába.

⁶⁵ A relativisztikus Einstein-törvényeknek megfelelően a sötét energiának - ami vélhetően univerzumunk gyorsuló tágulását okozza - van egy további hatása is: Óriási feszültséget eredményez a bránunkban, hasonlóan a kifeszített gumiszalagban vagy gumilepedőben ébredő feszültséghez. Azért, hogy az AdS-szendvicsen kívüli téridő görbületől mentes legyen, ahogyan szeretnénk, az Einstein-törvények azt is előírják, hogy mindegyik lezáró brán belső feszültsége miénkének fele legyen. Ez a feszültség teszi veszélyessé őket.

⁶⁶ Esetleg egyik vagy mindkét lezáró brán kifelé gömbül, kiszabadítva az AdS-réteget és megszüntetve így a Newton-féle gravitációs törvény inverz négyzetes lefutását. Ennek eredményeként a Nap elveszti bolygóit, ami nem olyan nagy gond az univerzum egésze szempontjából, de nagy szerencsétlenség az emberiségnek.

Végül a professzor egyenlete!

A fizika törvényei a matematika nyelvén vannak megfogalmazva. Mielőtt Cooper találkozott

volna Brand professzorral (az én történetemben), a professzor megpróbálkozott a hipertérmezők matematikai leírásával és annak magyarázatával, hogyan hozzák létre az anomáliákat, szabályozzák univerzumunk G gravitációs állandóját, tartják nyitva a féregjáratot, és óvják meg bránunkat az ütközéstől.

A matematikai konstrukcióban a professzor a munkatársai által összegyűjtött észlelési adatokra és az öt dimenzióban felírt relativisztikus Einstein-törvényekre támaszkodott.

Minden tudását egyetlen egyenletbe, AZ egyenletbe sűrítette, amelyet irodája tizenhat táblájának egyikére írt fel. 25.7. ábra)⁶⁷

MY EQUATION
for the Effective Action $S(\lambda, \xi, Q, \dots)$

$$S = \int \sqrt{-g} d^5x \left\{ \mathcal{L}_{\text{bulk}} + \sum_{\text{branes } Q=0,1,2} \delta(\sigma(x^4) - \sigma_Q) \mathcal{L}_{\text{brane}}^Q \right\}$$

Where!

$$\mathcal{L}_{\text{bulk}} = \frac{1}{16\pi G_5} (R_5 - 2\Lambda_5) - \frac{1}{2} \partial_\mu \alpha \partial^\mu \alpha - \frac{1}{2} U(\alpha) - \frac{1}{2} \sum_{\text{auxiliary fields } i,j} H_{ij}(Q^2) \nabla_\mu \Phi^i \nabla^\mu \Phi^j$$

$$\mathcal{L}_{\text{brane}}^Q = \frac{K}{16\pi G_5} + \frac{1}{2} (Q^2 - \lambda) \nabla_\mu \xi \nabla^\mu \xi + \frac{1}{2} \nabla_\mu \lambda \nabla^\mu \lambda + \frac{1}{2} \sum_{i,j} W_{ij} \Phi^i \Phi^j \mathcal{M}(\text{Standard model fields}) + \frac{1}{2} V(\sqrt{(\xi - \xi_0(Q^2))^2 + (\lambda - \lambda_0(Q^2))^2}) + (\text{Standard Model Terms})$$

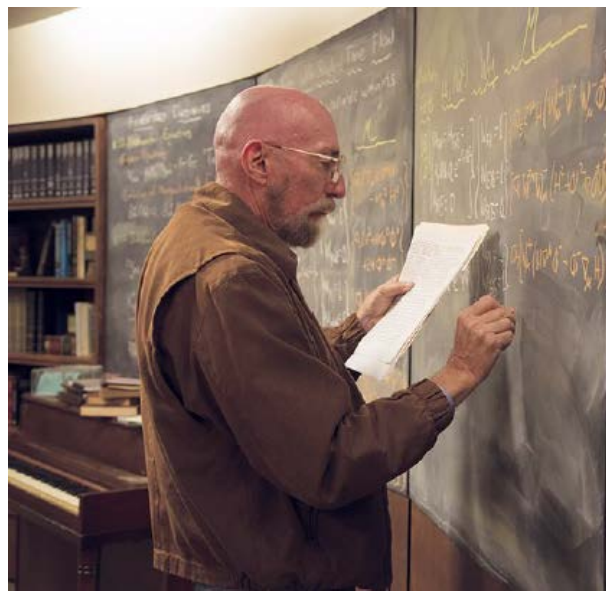
25.7. ábra

Brand professzor egyenlete.

A NASA-nál tett első látogatásakor Cooper látja az egyenletet, és az még harminc év múlva is ott van, amikor a szintén ragyogó fizikussá lett felnőtt Murph megpróbál segíteni a professzornak a megoldásában.

Az egyenlet egy ún. „hatást” ír le. A fizikusok jól ismerik azt a matematikai eljárást, amellyel kezelni lehet az ilyen típusú egyenleteket és származtatni belőlük az összes nem kvantált fizikai törvényt. A professzor egyenlete tulajdonképpen minden ilyen törvény szülőanyja.

De az *igazi* törvények előállításához, amelyek *helyesen* jelzik előre, hogy miként alakulnak ki az anomáliák, hogyan maradhat nyitva a féregjárat, miként szabályozható a G, és hogyan védhető



25.8. ábra

Felírom a professzor tábláira a sejtéseim.

⁶⁷ Az egyenletben szereplő különböző szimbólumok jelentése és az egyenlettel kapcsolatos egyéb információk a professzor másik tizenöt tábláján szerepelnek, amelyeket én írtam tele a forgatáshoz. Mind a tizenhat tábla fényképe megtalálható a könyv <https://interstellar.withgoogle.com/> honlapján.)

meg univerzumunk, az egyenletnek pontosan a megfelelő matematikai formában kell lennie. A professzor azonban nem tudja, mi a helyes forma. Csak sejtí. A sejtése megalapozott ugyan, de mégis csak sejtés.

Az egyenlet rengeteg feltételezést tartalmaz: feltételezéseket a tábláján szereplő " $U(Q)$, $H_{ij}(Q^2)$, W_{ij} , és $M(\text{standard model fields})$ " matematikai objektumokkal kapcsolatban. (25.7. ábra) Valójában ezek a hipertérmezők erővonalaira vonatkozó feltételezések, és azzal kapcsolatos sejtések, hogy ezek miként befolyásolják a bránunkat és az hogyan hat vissza rájuk. (Bővebb magyarázatért lásd a *Néhány szakmai megjegyzés* című részt a könyv végén.)



25.9. ábra

Murph a professzor sejtéseit szemléli.

Amikor a professzor és csapata az „egyenlet megoldásáról” beszélnek, nézetem szerint két dologra gondolnak. Egyrészt minden feltételezésük " $U(Q)$, $H_{ij}(Q^2)$, W_{ij} , és $M(\text{standard model fields})$ ” *konkrét* formában történő felírására, másrészt arra, hogy (a jól ismert eljárást követve) miként lehet származtatni az egyenletből mindent, amit tudni szeretnének univerzumunkról, az anomáliákról, de főként arról, hogyan lehetne azokat felhasználni az emberiség Földről való elszállításához.

Amikor a szereplők a filmben „a gravitáció megoldásáról” beszélnek, ugyanerre gondolnak.

A filmben láthatjuk, ahogyan a már idős professzor és a közben felnőtt Murph kísérletet tesznek az egyenlet iterációval történő megoldására. Az egyik táblán felsorolják az ismeretlen dolgokra vonatkozó feltevéseket (ezeket közvetlenül a jelenet felvétele előtt írtam fel a táblára). Ezután Murph az összes feltevést egy hatalmas, általuk írt számítógépes programba táplálja, amely meghatározza a feltevéseket kielégítő fizikai törvényeket és azok gravitációs anomáliák viselkedésére vonatkozó előrejelzéseit.

Elképzelésem szerint egyik feltevés sem jósol a megfigyeltékhez hasonló anomáliákat. A filmben azonban a professzor és Murph *tovább* próbálkoznak. Egy adott feltevésre kiszámítják annak következményeit, majd a következőre ugranak. Egyik feltételezést teszik a másik után, amíg csak bírják. Másnap pedig kezdik újra.

A film kicsit későbbi részében a professzor halálos ágyán bevallja Murphnek, hogy becsapta: „Én hazudtam, Murph. Hazudtam neked.” Megrendítő jelenet. Murph rájön, hogy valami a

kezdetektől fogva nem stimmelt az egyenlettel. Egy nem kevésbé megrendítő jelenetben a bolygóján dr. Mann ugyanezt mondja a professzor lányának.

De, ahogyan azt Murph nem sokkal a professzor halála után felismeri: „Helyes az egyenlete. És évek óta megvolt. A megoldás fele.” A másik fele egy fekete lyukban található. Egy fekete lyuk szingularitásában.

26. Szingularitások és a kvantumgravitáció

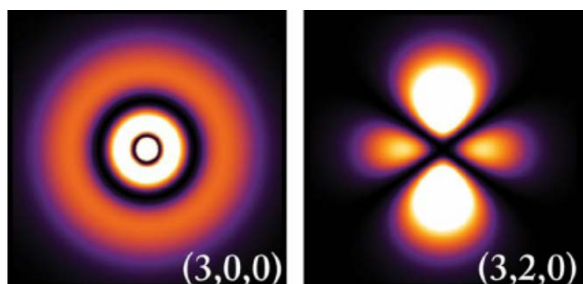
A Csillagok között-ben Cooper és TARS olyan kvantuminformációt keresnek a Gargantua belsejében, amely segíthet a professzornak egyenlete megoldásában és az emberiség elszállításában a Földről. Úgy gondolják, hogy az adatoknak a Gargantua magjának szingularitásában kell lenniük, amelyről Romilly azt mondja, hogy "szelíd". Mi az a kvantuminformáció? Hogyan segíthet a professzornak? És milyen a szelíd szingularitás?

A kvantumtörvények mindenekfelett



Univerzumunk alapvetően kvantumviselkedésű. Ez alatt azt értem, hogy véletlenszerűen egy kicsit minden fluktuál. Minden!

Ha apró dolgokat nagyon pontos műszerekkel vizsgálunk, nagy fluktuációkat (ingadozásokat) láthatunk. Egy elektron helyzete egy atomban olyan gyorsan és olyan véletlenszerűen fluktuál, hogy nem is tudjuk megmondani, egy adott pillanatban hol van az elektron. A hely bizonytalansága akkora, mint az atom maga. Ez az oka annak, hogy a fizika kvantumtörvényei az elektron tartózkodási valószínűségéről szólnak és nem a valódi helyéről (26.1. ábra).



26.1. ábra.

Az elektron tartózkodási valószínűsége egy hidrogénatom két különböző állapotában. A valószínűség a fehér tartományokban nagy, a vörösekben kisebb, a feketékben pedig nagyon kicsi. A $(3,0,0)$ és $(3,2,0)$ számhármasok az állapotokat jellemző ún.

Ha műszereinkkel nagy dolgokat tanulmányozunk, megfelelő pontosság esetén ekkor is láthatunk fluktuációkat. A nagy dolgok fluktuációi azonban nagyon kicsik. A LIGO gravitációshullám-detektoraiban (16. fejezet) lézernyalábok figyelik a 40 kilogrammos felfüggesztett tükrök pozícióit ⁶⁸. (Pontosabban azok tömegközéppontjainak pozícióját.) Ezek véletlenszerűen ingadoznak, de egy atom méreténél sokkal kisebb mértékben: valójában annak csak egy tízmilliárdod részével.

Mindazonáltal a LIGO lézernyalábjai néhány éven belül érzékelni fogják majd ezeket a fluktuációkat. (A LIGO felépítése olyan, hogy a gravitációs hullámok mérését zavaró egyéb

⁶⁸ Pontosabban azok tömegközéppontjainak pozícióját.

véletlen ingadozások kiküszöbölhetők, nem utolsósorban nekem és tanítványaimnak köszönhetően.)

Mivel az emberi léptékű vagy nagyobb objektumok kvantumfluktuációi nagyon kicsik, a fizikusok majdnem mindig el is hanyagolják azokat. Ez pedig matematikai szempontból egyszerűsíti a fizikai törvényeket.



26.2. ábra

A LIGO egyik 40 kg-os tükre beépítésre előkészítve. A pozíciója kvantummechanikai értelemben fluktuál, egy atom átmérőjének egy tízmilliárdod részével

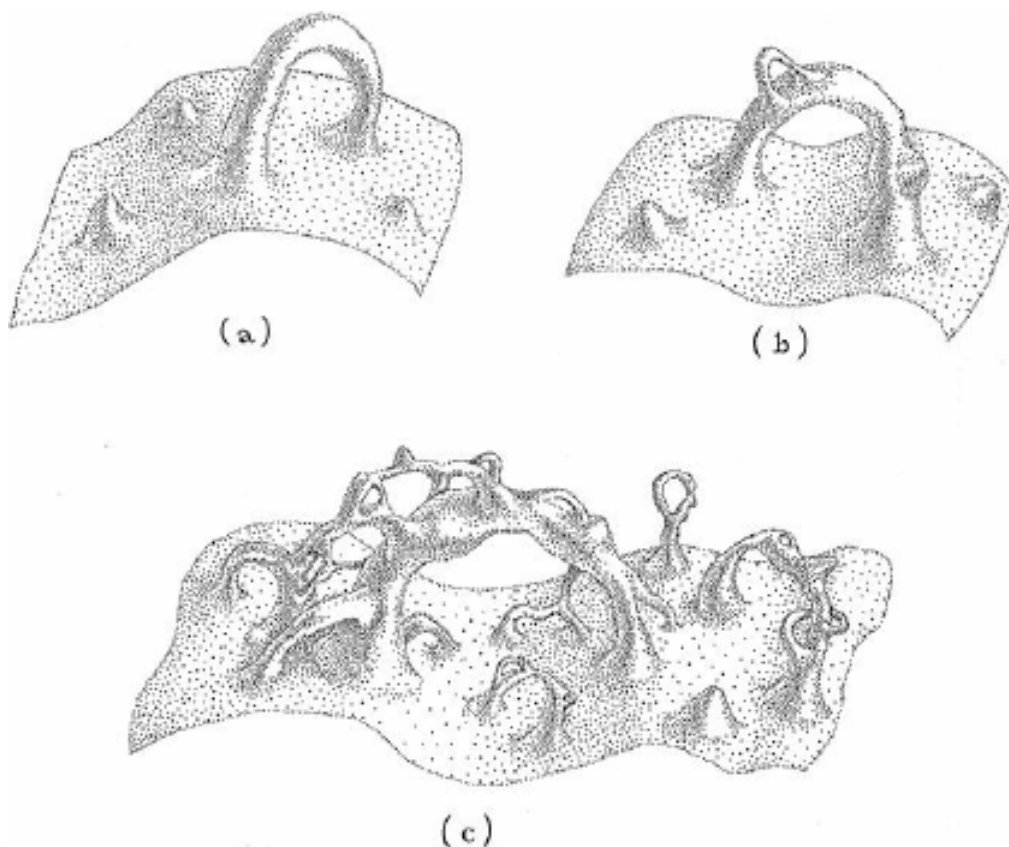
A gravitációt figyelmen kívül hagyó és a fluktuációktól eltekintő kvantumtörvényekből a newtoni fizika törvényei származtathatók, amelyekkel az elmúlt évszázadok során a bolygók mozgását, a csillagokat felépítését, a hidak szerkezetét, vagy a golyók ütközését leírtak (lásd 3. fejezet).

Ha a fluktuációkat a kvantumgravitáció sokkal kevésbé ismert törvényeiből kiindulva hanyagoljuk el, akkor a fizika jól ismert Einstein-féle relativisztikus törvényeit kell kapnunk. Elhanyagolt fluktuációk például a hihetetlenül kicsiny féregjáratok (az egész teret átható „kvantumhab” (26.3. ábra és 14. fejezet 14.7. ábra)⁶⁹. Ha eltekintünk ezen ingadozásoktól, az Einstein-törvények pontosan írják le a tér és az idő görbületét egy fekete lyuk körül és az időlassulást a Földön.

Ennyi előkészítés után jön a csattanó: *Ha a professzor felfedezné a befoglaló tér és a bránunk kvantumgravitációjának törvényeit, ezek fluktuációit elhanyagolva meg tudna határozni egyenlete pontos alakját* (25. fejezet). Ez pedig elárulná neki a gravitációs anomáliák eredetét és azt, hogyan lehetne azokat felhasználni (ebben reménykedik) az emberiség el költöztetésére a Földről.

Elgondolásom szerint a professzor tudja ezt, és azt is, hol lehet a kvantumgravitáció törvényeit megismerni: *a szingularitásokban.*

⁶⁹ John Wheeler már 1953-ben megjósolta a 10^{-33} méter méretű féregjáratok alkotta kvantumhab létezését. Ez az ún. Planck-hossz 25 nagyságrenddel kisebb egy atom átmérőjénél, billiomod részének 10 billiomod része.



26.3. ábra.

Kvantumhab. Bizonyos (mondjuk, 0,4) valószínűséggel a hab a bal felső, egy másik (mondjuk, 0,5) valószínűséggel a jobb felső, egy harmadikkal (0,1) pedig az alsó részen látható alakot vesz fel.

Szingularitások: A kvantumgravitáció birodalma

①

Egy szingularitás ott kezdődik, ahol a tér és idő görbülete határtalanul megnő. A görbületek a szingularitásban végtelen nagyok lesznek.

Ha univerzumunk görbült terét az óceán hullámzó felszínéhez hasonlítjuk, akkor a szingularitás kezdete egy éppen átbukni készülő hullám teteje, a szingularitás belseje pedig az átbukás utáni hab (26.4. ábra). A taraj előtti sima hullámot „sima” fizikai törvények írják le, az einsteini relativisztikus törvényekhez hasonlóan. Az átbukás után keletkező hab leírása azonban már a víz habzását is kezelni képes törvényeket igényel. Ugyanígy kellene a kvantumgravitáció törvényei a kvantumhab leírásához.



26.4. ábra.

Szingularitás egy óceáni bukóhullám tetején.

A szingularitások a fekete lyukak magjában találhatók. A relativisztikus Einstein-törvények egyértelműen jelzik létezésüket, még akkor is, ha ugyanezen törvények nem tudják megmondani, mi is történik egy szingularitásban. Ehhez kellenek a kvantumgravitáció törvényei.

1962-ben a Caltechről, ahol a diplomámat szereztem, Princetonba mentem, hogy ott folytassam a doktori fokozat megszerzéséhez szükséges tanulmányaimat. Azért választottam Princetont, mert ott tanított John Wheeler, aki korának legnagyobb, a relativisztikus Einstein-törvényekkel foglalkozó elméje volt. Tőle akartam tanulni.

Egy szeptemberi napon megilletődötten kopogtattam Wheeler professzor irodájának ajtaján. Ez volt első találkozásom a nagy emberrel. Kedves mosollyal üdvözölt, bevezetett, majd azonnal - mintha nem is egy kezdő, hanem egy nagyra becsült kolléga lennék - elkezdett a csillagok összeroskadásának rejtélyeiről beszélni. Azokról a kollapszusokról, amelyek a fekete lyukak és bennük a szingularitások keletkezéséhez vezetnek. Azt mondta, ezek a szingularitások "azok a helyek, ahol Einstein relativisztikus törvényei és a kvantumtörvények szenvedélyes násza beteljesedik". Wheeler szerint a nász gyümölcsei, a kvantumgravitáció törvényei, a szingularitásban érnek be teljesen. Ha megértenénk a szingularitásokat, megismernénk a kvantumgravitáció törvényeit is. A szingularitások jelentik a kvantumgravitáció rosette-i követ.



26.5. ábra.

John Wheeler a szingularitásról, a fekete lyukakról és az univerzumból tart előadást 1971-ben.

Ez a „magánkihallgatás” teljesen megtérített. Wheeler előadásainak és írásainak hatására ugyanez történt sok más fizikussal is, akik nekiálltak, hogy megértsék a szingularitásokat és kvantumgravitációjuk törvényeit. A kutatás azóta is folyik. Egyik eredménye a szuperhúrelmélet, amely szerint univerzumunknak egy magasabb dimenziós befoglaló térbe ágyazódó bránnak kell lennie (21. fejezet).

Csupasz szingularitások?



Mesés lenne, ha találnánk vagy létrehozhatnánk egy fekete lyukon kívüli szingularitást. Egy olyan szingularitást, amelyet nem rejt el egy fekete lyuk eseményhorizontja. Egy csupasz szingularitást. Ez megkönnyítené Brand professzor dolgát a *Csillagok között*-ben. A szükséges kvantuminformációt a NASA laboratóriumában nyerhetné ki a csupasz szingularitásból. 1991-ben John Preskill és én fogadást kötöttünk a csupasz szingularitásokról barátunkkal, Stephen Hawkinggal. A Caltech professzoraként Preskill a kvantuminformáció egyik legnagyobb szakértője a világon. Stephen pedig az a tolószékes fickó”, aki szerepel a *Star Trek*, *A Simpson család* és az *Agymenők* című sorozatokban⁷⁰.

⁷⁰ *Star Trek: Az új nemzedék*, 6. évad 26. rész; *A Simpson család*, 1999 és 2010 között 4 részben; *Agymenők (The Big Bang Theory)*, 2012 és 2015 között 4 részben. A részleteket lásd a <http://www.imdb.com> oldalon. (A fordító megjegyzése.)

Mellesleg pedig korunk egyik legnagyobb géniusza. John és én azt mondtuk, hogy a fizika törvényei megengedik a csupasz szingularitások létezését, Stephen pedig azt, hogy tiltják. (26.6. ábra)

26.6. ábra

A fogadásunk a csupasz szingularitásokról.

Mivel Stephen W. Hawking szilárdan meg van győződve arról, hogy a csupasz szingularitások az ördögtől való, és a klasszikus fizika törvényei tiltják létezésüket, míg John Preskill és Kip Thorne kvantumgravitációs objektumoknak tekinti azokat, amelyek az eseményhorizont által nem rejtve, az egész univerzum számára láthatóan is létezhetnek. Hawking fogadást ajánl, amelyet Preskill és Thorne elfogad. Hawking 700 font sterlinget tesz 50 ellen arra, hogy ha a klasszikus anyag vagy mező bármely formáját, amely sík téridőben nem válhat szingulárisá, a klasszikus Einstein-egyenletek segítségével az általános relativitáselméletbe illesztjük, az eredmény soha nem lehet csupasz szingularitás. A győztes kap egy ruhát is a vesztestől, hogy eltakarhassa csupaszságát. A ruhára a vereséget elismerő üzenetet kell hímezni.

Stephen W. Hawking - John Preskill és Kip S. Thorne
Pasadena, California, 1991.
szeptember 24.

Formálisan vesztettem. 1977.
február 5.

Stephen W. Hawking

Whereas Stephen W. Hawking firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager with odds of 100 pounds sterling to 50 pounds sterling, that when any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, the result can never be a naked singularity.

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable concessionary message.



John P. Preskill Kip S. Thorne

Stephen W. Hawking John P. Preskill & Kip S. Thorne
Pasadena, California, 24 September 1991

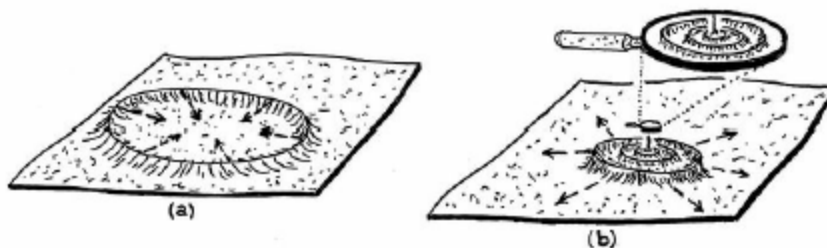
Conceded on a
Technicality
5 Feb. 1997:



Stephen W. Hawking

Egyikünk sem gondolta, hogy fogadásunk milyen gyorsan eldőlt. Mindössze öt év múlva Matthew Choptuik, a University of Texas posztdoktori ösztöndíjasa egy szuperszámítógépes szimulációt futtatott annak reményében, hogy a fizikai törvények új és váratlan tulajdonságait tárhatja fel, és megütötte a főnyereményt.

Egy gravitációs hullám összeomlását modellezte.⁷¹ Amikor az összeomló hullám gyenge volt, összeroskadt és eltűnt. Amikor erős volt, összeroskadt, és egy fekete lyukat hozott létre. Ha



26.7. ábra.

Összeroskadó gravitációs hullám.

Jobbra: A hullám által okozott forrás és a csupasz szingularitás a nagyító lencséjének közepén

azonban erőssége pontosan egy közepes értékre volt „hangolva”, a hullám a téridő alakjában egy rövid tranziens jelenséget („forrást”) okozott, amely kifelé haladó, egyre rövidebb hullámhosszú gravitációs hullámokat eredményezett. Végül egy infinitezimálisan kicsiny csupasz szingularitást hagyott hátra (26.7. ábra).

Ilyen szingularitás a természetben soha nem fordulhat elő. A szükséges hangolás ugyanis nem természetes dolog. De egy rendkívül fejlett civilizáció, precízen hangolva a hullám összeomlását, mesterségesen talán előállíthat egy ilyen szingularitást, majd a viselkedéséből kiolvashatja a kvantumgravitáció törvényeit.

Choptuik szimulációját látva Stephen elismerte ugyan, hogy „formálisan” vesztett, de a pontos hangolás szükségességét tisztességtelennek tartotta. Azt szeretne volna tudni, hogy a csupasz szingularitások természetes módon is előfordulhatnak-e, így megújítottuk a fogadást, azzal a kitéttel, hogy semmilyen finomhangolás nem engedélyezett. Mindenesetre Stephen nagy nyilvánosság előtti bejelentése óriási szenzáció volt. A *New York Times* címlapon hozta. Megújított fogadásunk ellenére én magam is kételkedem abban, hogy univerzumunkban létezhetnének csupasz szingularitások. A *Csillagok között*-ben dr. Mann



26.8. ábra.

Hawking egy 1997-es előadásán a Caltechen Preskill és Thorne előtt elismeri, hogy vesztett.

⁷¹ Valójában egy skalármezőnek nevezett dolgot szimulált, de ez technikai szempontból mellékes. Néhány évvel később Andrew Abrahams és Chuck Evans (University of North Carolina) egy gravitációs hullámmal is megismételték Choptuik szimulációit, és ugyanazt az eredményt kapták: egy meztelen szingularitást.

határozottan ki is jelenti, hogy „csupasz szingularitás nincs a természetben”, és Brand professzor sem említi soha ezt a lehetőséget. Ehelyett a fekete lyukakban lévő szingularitásokra fókuszál. Úgy gondolja, csak bennük reménykedhetünk, hogy megismerhessük a kvantumgravitáció törvényeit.

BKL-szingularitás egy fekete lyuk belsejében



Wheeler korában (az 1960-as években) úgy véltük, hogy egy fekete lyuk belsejében lévő szingularitás olyan, mint egy pont. Egy pont, amely addig nyomja össze az anyagot, amíg az végtelen nagy sűrűségű nem lesz és megsemmisül.

26.9. ábra.

Lia Halloran fantáziarajza, fekete lyukakról és a szingularitásairól (a 4.5. ábra részlete)



Ez az oka annak, hogy a könyvben eddig milyen módon ábrázoltam egy fekete lyuk szingularitását.

A Wheeler-korszak óta az Einstein-törvényeken alapuló matematikai számításokból megtanultuk, hogy ezek a csúcsos szingularitások instabilak. Nagyon pontos hangolást igényel, hogy a fekete lyukak belsejében létrejöhessenek. Ha egy kicsi perturbáció éri őket, például valamilyen behulló anyagtól, hihetetlen mértékben megváltoznak. De mi lesz belőlük?

Három orosz fizikus - Vlagyimir Belinszkij, Iszak Halatnyikov és Jevgenyij Lifsic - hosszú, bonyolult számítások után találta meg a választ 1971-ben. 2000-ben pedig, amikor a számítógépes szimulációk már kellően fejlettek voltak hozzá, David Garfinkle (Oakland University) meg is erősítette sejtésüket. A stabil szingularitásra Belinszkij, Halatnyikov és Lifsic tiszteletére ma BKL-ként hivatkoznak⁷².

⁷² Mivel Halatnyikov nevének angol átírása Khalatnyikov. (a szakmai lektor megjegyzése)

A BKL-szingularitás kaotikus, mégpedig nagyon. És halálos is. Szintén nagyon.

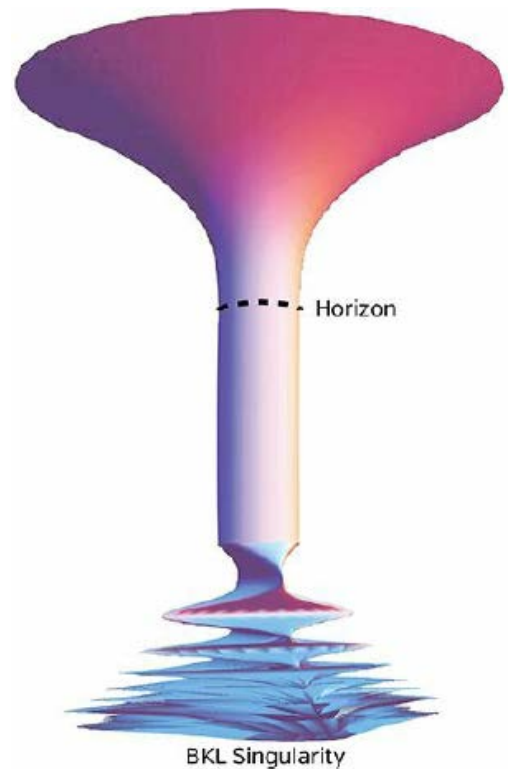
A 26.10. ábrán a görbült teret ábrázoltam egy gyorsan forgó fekete lyukon kívül és a belsejében.

A BKL-szingularitás alul látható. Ha belezuhanunk ebbe a fekete lyukba, a belseje először sima és talán még kellemes is. De ahogyan közeledünk a szingulárisához, a tér körülöttünk kaotikus módon elkezd nyúlni és összenyomódni. Az árapályerőkkel ugyanez történik, szintén kaotikusan. A nyúlás és az összenyomódás először enyhe, de nagyon gyorsan erőssé, illetve ultraerőssé válik. Lágyszöveteink és csontjaink ezt előbb-utóbb nem bírják, szétszakadnak, eltörnek. Ugyanez történik a testünket alkotó atomokkal is - azok is a felismerhetetlenségig torzulnak.

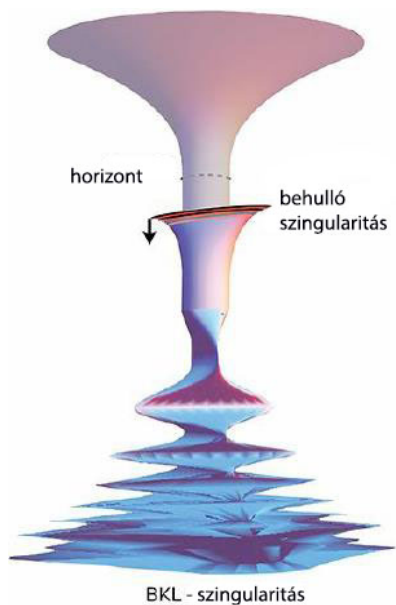
Mindezt kaotikus természetével együtt Einstein relativisztikus törvényei írják le. Ezt jósolta meg a három orosz. Amit azonban mindmáig sem ők és senki más sem tudott előre jelezni, az az atomi és szubatomi részek sorsa, amint ez a kaotikus deformáció végtelen nagygyá nő. A választ csak a kvantumgravitáció adhatja meg. Mi azonban ekkor már rég halottak vagyunk, a kvantuminformáció kinyerése és a visszatérés bármiféle esélye nélkül.

26.10. ábra.

Egy, a Gargantuához hasonlóan gyorsan forgó fekete lyuk görbült tere, alul egy BKL-szingularitással. A nyújtás és az összenyomás szingularitáshoz közeli kaotikus változásának ábrázolása a megértést szolgálja, nem pontos.



Ezt a részt az  szimbólummal megalapozott feltételezésnek jelöltem, mivel *nem* vagyunk teljesen biztosak abban, hogy egy fekete lyuk magjában lévő szingularitás BKL típusú-e. A BKL -



26.11. ábra.

A fekete lyukba utánunk hulló anyag által létrehozott behulló szingularitás. Az anyagot a fekete, vörös, szürke és narancssárga színű rétegek változásával érzékeltetjük.

szingularitásokat a relativisztikus Einstein-törvények mindenestre biztosan megengedik. Ezt Garfinkle is megerősítette számítógépes szimulációival. Sokkal kifinomultabb szimulációk szükségesek azonban annak megerősítéséhez, hogy az óriási nyúlás és összenyomás BKL-mintázatai valójában meg is jelennek-e egy fekete lyuk magjában.

Én magam csaknem teljesen biztos vagyok benne, hogy a válasz „igen, megjelennek” lesz. De mégsem teljesen.

Egy fekete lyuk behulló és kirepülő szingularitásai



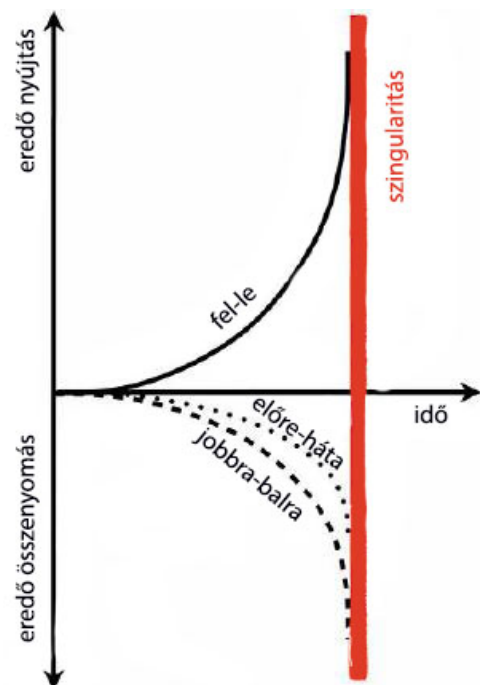
Az 1980-as években fizikus kollégáimmal együtt megalapozott feltételezésként meg voltunk győződve arról, hogy egy fekete lyukban csak egy szingularitás van, mégpedig a BKL típusú. De tévedtünk.

1991-ben Eric Poisson és Werner Israel (University of Alberta) az Einstein-egyenletek matematikájában egy második szingularitást is felfedezett. Ez a fekete lyuk korával növekszik. Oka az extrém időlassulás a fekete lyuk belsejében.

Ha egy Gargantuához hasonló fekete lyukba zuhanunk, elkerülhetetlenül sok minden egyéb hullik még utánunk: gáz, por, fény, gravitációs hullámok és így tovább. A külső szemlélő számára millió, milliárd évekig tarthat, mire ez az anyag belép a lyukba. A lyukból nézve azonban az extrém időlassulás miatt csak néhány másodpercet, vagy még kevesebbet vehet igénybe. Ennek eredményeként ez az anyag belülről nézve egy vékony rétegbe rendeződik, amely fénysebességgel vagy ahhoz közeli sebességgel zuhan felénk befelé. A réteg intenzív árapályerőket generál, amelyek eltorzítják a teret és persze minket is, ha a réteg elér bennünket. Az árapályerők végtelen nagyra nőnek. Az eredmény egy "behulló szingularitás" (26.11. ábra),⁷³ amelyet a kvantumgravitáció törvényei vezérelnek. Poisson és Israel szerint azonban az árapályerők olyan gyorsan növekszenek, hogy csak véges mértékben deformálnak bennünket a szingularitás elérésének pillanatában. Ezt magyarázza a 26.12. ábra, amely a fel-le irány menti eredő nyújtást, illetve az előre-hátra és jobbra-balra irányban ható eredő összenyomást mutatja az idő függvényében. Amikor a szingularitás elér bennünket, az eredő nyújtás és összenyomás véges, a nyúlásunk és összenyomódásunk üteme (a fekete görbék meredeksége) azonban végtelen. A változás végtelen nagy árapályerőket okozó végtelen nagy üteme jelzi a szingularitást.

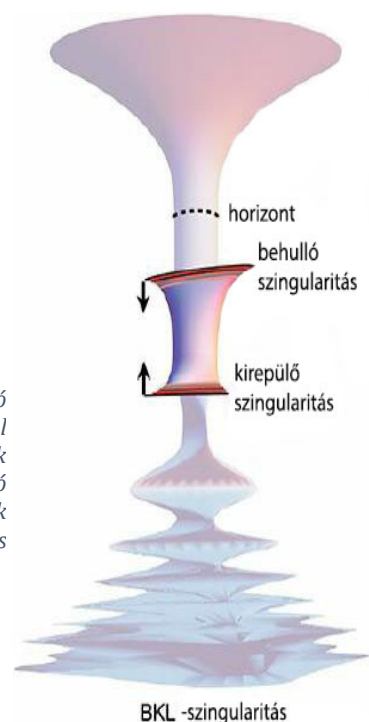
Mivel testünk csak véges mértékben nyúlik meg és nyomódik össze, elképzelhető, hogy túlélhetjük a szingularitás elérését. (Elképzelhető, de szerintem nagyon valószínűtlen.) Ebben az értelemben a behulló szingularitás sokkal „szelídebb”, mint a BKL-

Az előttünk a fekete lyukba hulló anyagból visszaszóródott rész által létrehozott kirepülő és a mögöttük zuhanó anyag által okozott behulló szingularitás. A szendvicsben mi vagyunk a töltelék. A fekete lyuk külső részét és BKL-singularitást.



26.12. ábra

Az általunk érzékelt nyújtás és összenyomás változása az idő függvényében. amikor a behulló szingularitás leér hozzánk.



⁷³ Israel és Poisson ennek a szingularitásnak a tömegfelfúvódási szingularitás (mass inflation singularity) nevet adta, és a fizikusok is így ismerik azóta. Nekem azonban jobban tetszik a behulló szingularitás (infalling singularity), így a könyvben ezt az elnevezést használom.

szingularitás. Ha túl is éljük, csak a kvantumgravitáció törvényei alapján tudhatnánk meg, hogy mi történik ezt követően.

Az 1990-es, 2000-es években mi fizikusok úgy véltük, ez a teljes sztori: A fekete lyuk születésével egy BKL-szingularitás, és egy növekvő behulló szingularitás keletkezik. Ez minden.

Aztán 2012 vége felé, miközben Christopher Nolan a *Csillagok között* forgatókönyvének újraírásáról és a rendezésről társait, Donald Marolf (University of California, Santa Barbara) és Amos On (The Technion, Haifa) egy harmadik típusú szingularitást is felfedezett. Természetesen nem csillagászati megfigyelésekkel, hanem az einsteini relativisztikus törvények alapos és mélyreható tanulmányozásával.

Utólag megítélve, ezen szingularitás létezésének már korábban is nyilvánvalónak kellett volna lennie. Az ún. kirepülő szingularitás a fekete lyuk öregedésével ugyanúgy növekszik, mint a behulló szingularitás. Az az anyag (gáz, por, fény, gravitációs hullámok stb.) hozza létre, ami *előttünk* hullott be a fekete lyukba (26.13. ábra). Ennek az anyagnak egy kis része a fekete lyuk tér- és időgörbületén szóródva visszaverődik felénk, hasonlóan ahhoz, ahogyan a tény szóródik egy görbült sima óceáni hullámon, létrehozva így a hullám képét.

A visszaszórt anyag a fekete lyuk extrém időlassulása miatt egy, a hangrobbanás lökéshullámfrontjához hasonló vékony rétegbe sűrűsödik. Az anyag gravitációja árapályerőket generál, amelyek végtelenné nőnek, így *kirepülő szingularitás* keletkezik. Azonban a behullóhoz hasonlóan a kirepülő szingularitás árapályerői is szelídek. Olyan gyorsan, olyan hirtelen nőnek meg, hogy ha egyet megközelítünk, eredő deformációnk nem végtelen, hanem véges lesz a szingularitás elérésekor.

A *Csillagok között*-ben Romilly ezekről a szelíd szingularitásokról beszél Coopernek: „Lenne egy javaslatom az útja kapcsán. [...] Nézze meg azt a fekete lyukat. [...] A Gargantua egy öreg forgó fekete lyuk. Az ilyet úgy nevezzük, hogy szelíd szingularitás.” „Szelíd? - kérdezi Cooper. - Cseppet sem az. De ott olyan az árapály-gravitáció, hogy ami elég gyorsan lépi át a horizontot, egyben maradhat.” Cooper a beszélgetéstől és a kvantuminformáció kereséséről fellelkesülve később a Gargantuába veti magát (28. fejezet). Bátor ugrás. Nem tudhatja előre, vajon túl fogja-e élni. Csak a kvantumgravitáció törvényei mondhatják meg biztosan. Vagy a hipertérleányek...

Felváztuk azokat az extrém fizikai alapokat, amelyek a *Csillagok között* végkifejletének megértéséhez kellenek. Nézzük tehát a csúcspontot!

VII. CSÚCSPONT

27. A vulkán pereme



A *Csillagok között* vége felé Coopernek éppen csak sikerült kihoznia az *Endurance*-t a Mann bolygója feletti halálos pörgéséből, a megkönnyebbültség érzését azonban megzavarja CASE: "Már vonz minket a Gargantua."

Cooper gyorsan dönt: "A navigációs alrendszer teljesen tönkrement. A létszükségleti készlet a Földre nem tart ki. Edmunds bolygójáig elvergődhetünk." "Jó. És az üzemanyag?" - kérdezi Amelia Brand. "Nincs elég" - válaszolja Cooper. "Hagyjuk, hogy a Gargantua a horizontja közelébe húzzon, és egy parittyával eldobatjuk magunkat Edmunds bolygója felé." "Szemmértékkel?" "Mire jó egy pilóta? A kritikus pályán belülre viszem a hajót."

Néhány percen belül a kritikus pályánál vannak, és elszabadul a pokol.

Ebben a fejezetben ennek a magyarázatát írom le.

Gravitációs árapályerők: Az *Endurance* elszakítása Mann bolygójától

Az én forgatókönyvemben Mann bolygója nagyon elnyúlt pályán kering (19. fejezet). Amikor az *Endurance* megérkezett a bolygóhoz, az még messze járt a Gargantuától, de már közeledett hozzá. Az *Endurance* robbanása már a fekete lyuk közelében következett be (27.1. ábra)

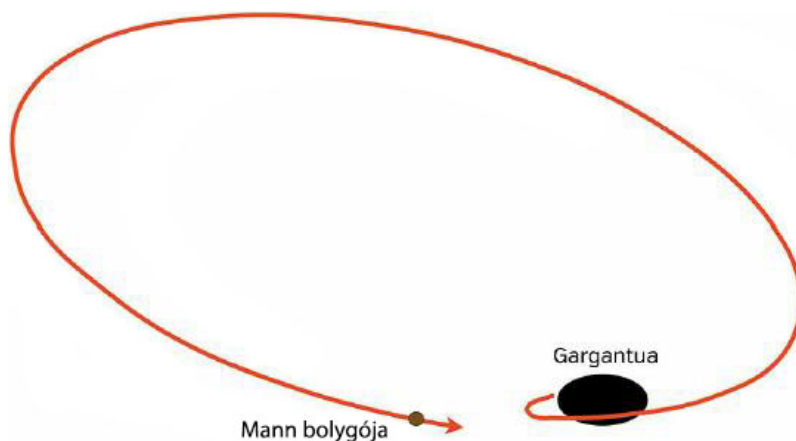
Cooper a robbanás után megmenti az *Endurance*-t, és eltávolítja a bolygóról. Értelmezésem szerint elég magasra emeli a hajót ahhoz, hogy a Gargantua óriási árapályerői egy másik pályán elhúzzák a bolygótól (27.2. ábra).

A centrifugális erők Mann bolygóját újra kifelé terelik, miközben az *Endurance* a kritikus pálya felé tart.⁷⁴

⁷⁴ A nagy különbség oka, hogy az árapályerők következtében az *Endurance* impulzusnyomatéka valamivel kisebb lett, mint Mann bolygójáé. A 27.3. ábrán az *Endurance* felkúszik a vulkán peremére. Mann bolygója azonban nem, az szépen visszaspirálózik a vulkán oldalán (a centrifugális erők kifelé tolják), majd utána fel a gravitációsenergia-felületen, távolodva a Gargantuától.

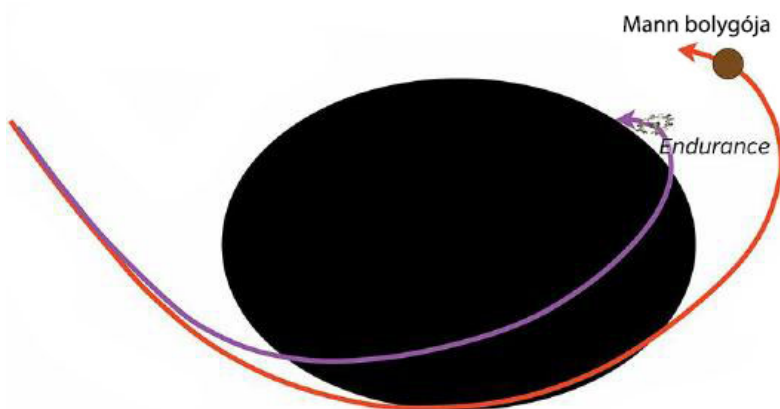
27.1. ábra.

Mann bolygójának pályája és a bolygó pozíciója az Endurance robbanásának pillanatában



27.2. ábra.

Az Endurance a Gargantua árapályerőinek hatására eltávolodik Mann bolygójától.



A kritikus pálya és a vulkán-analógia

A kritikus pályát egy olyan ábra segítségével mutatom be, amelyet korábban még nem használtam, ezt a 27.3. ábra. Először heurisztikus írom le a képet, majd a fizikusok által használt nyelven is.

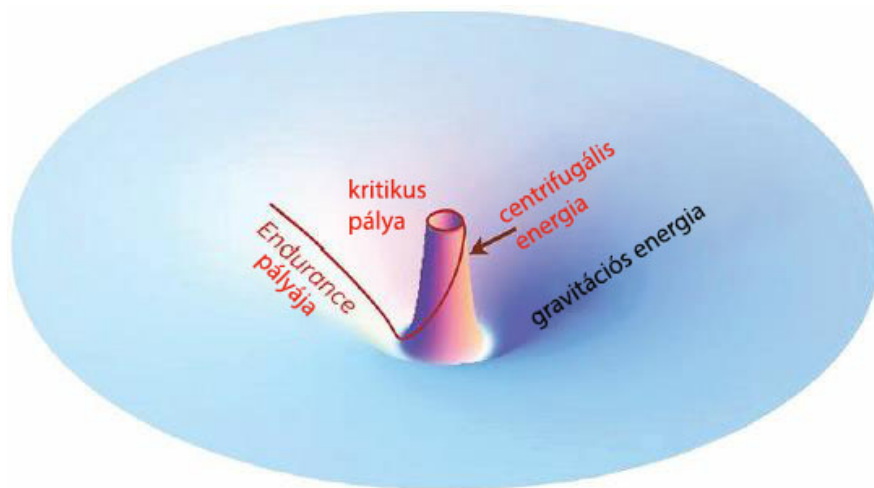
Gondoljuk azt, hogy a 27.3. ábrán látható felület, ami leginkább egy kuglófsütőre emlékeztet, egy sima gránitszobor lakásunk nappalijában, amely bemélyed, és ebből emelkedik ki egy faragott vulkáni kráter.

Az Endurance - miután eltávolodott Mann bolygójától - egy kicsi golyó, ami szabadon gurul ezen a gránitfelületen. Amint befelé gördül a mélyedésbe, a felület növekvő meredeksége miatt a sebessége is nő. Elérve a vulkánkúpot, egyre csökkenő sebességgel felszalad az oldalán, majd megérkezik a vulkán peremére, ahol a maradék sebességével körpályára áll. Egyik kört a másik után teszi meg a peremen, az instabil pályán finoman egyensúlyozva a vulkánba zuhanás és a mélyedésbe visszaesés között.

A vulkán belseje a Gargantua, pereme pedig a kritikus pálya, ahonnan az *Endurance* elindult Edmonds bolygója felé.

A vulkán-analógia jelentése: a gravitációs és a centrifugális energia

Azért, hogy el tudjam magyarázni a vulkán-analógia jelentését - azt, hogy mi köze van a fizikai törvényekhez kicsit szakszerűbbnek kell lennem.



27.3. ábra.

Az Endurance pályája a gravitációs és a centrifugális energiáját reprezentáló, vulkánhoz hasonló felületen

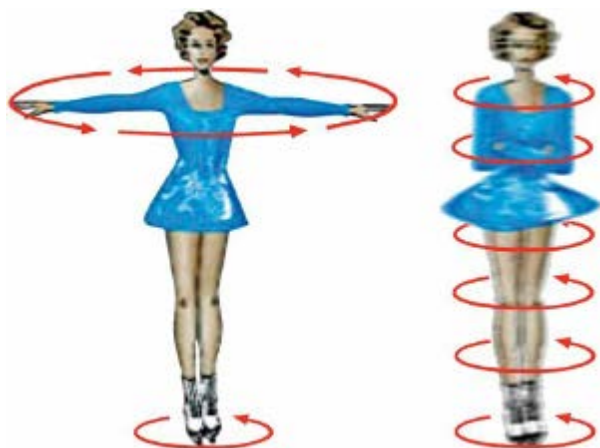
Az egyszerűség kedvéért tegyük fel, hogy az *Endurance* a Gargantua egyenlítői síkjában mozog. (Nemegyenlítői pálya esetén a lényeg nem változna ugyan, de a fekete lyuk nem gömbszimmetrikus volta miatt a részletek jóval bonyolultabbak lennének.) A vulkán-analógia találóan kapcsolja össze a kritikus pálya valódi fizikai hátterét és a Gargantua körüli trajektóriákat. A magyarázathoz két fizikai fogalomra lesz szükségem: ezek az *impulzusnyomaték* és az *energia*.

Tekintsük az *Endurance* impulzusnyomatékát (a Gargantua körüli keringési sebessége szorozva az attól mért távolságával ⁷⁵), miután az árapályerők hatására eltávolodott Mann bolygójától. A relativisztikus törvények szerint az impulzusnyomaték megmaradó mennyiség, azaz nem változik az *Endurance* pálya menti mozgása során, lásd 10. fejezet. Ez azt jelenti, hogy amint az *Endurance* közeledik a Gargantuához, azaz távolságuk csökken, a keringési sebessége nő.

⁷⁵ Ez valójában tömeg egységre vonatkoztatott impulzusnyomaték. Az impulzusnyomaték ennél valamivel bonyolultabb fizikai mennyiség, valójában a szóban forgó test hely- és sebességvektora, valamint a tömege szerepelnek benne, és maga is vektormennyiség. *(A fordító megjegyzése)*

Hasonlóan ahhoz, ahogyan a jégen piruettező műkorcsolyázó forgása is gyorsul, ha behúzza a karjait.

Az *Endurance* energiája adott mennyiségű, amikor a Gargantua felé fordul. Az



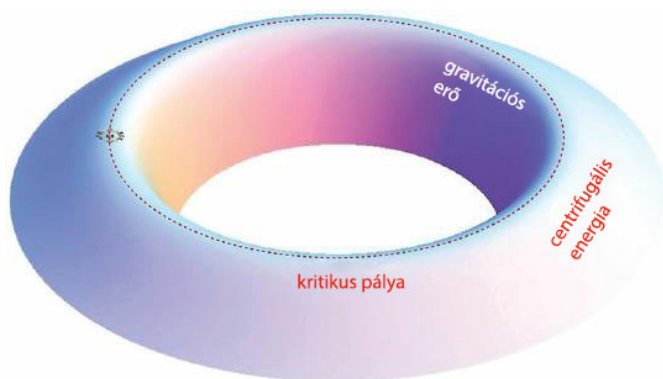
27.4. ábra.

Piruettező műkorcsolyázó

impulzusnyomatékhoz hasonlóan ez is megmarad a pálya mentén. Az összenergia három részből áll: a *gravitációs potenciális energia* (röviden *gravitációs energia*), amely egyre nagyobb negatív érték lesz, ahogyan az *Endurance* közeledik a Gargantuához, a *centrifugális energia* (a Gargantua körüli keringés energiája), amely a közeledéssel nő a mozgás sebességének növekedése miatt, és a *radiális kinetikus energia* (a Gargantua irányában történő mozgás energiája).⁷⁶

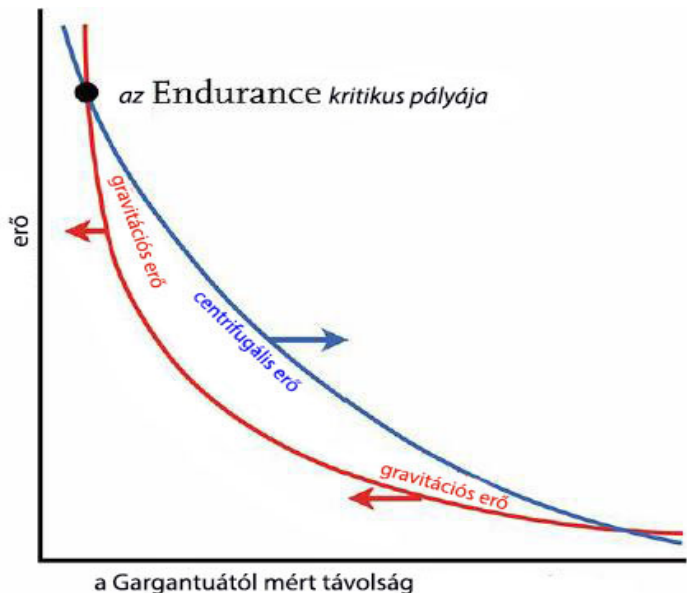
A 27.3. ábrán látható felületet függőleges irányban az *Endurance* gravitációs és centrifugális energiájának összege, vízszintes irányban pedig a Gargantua egyenlítői síkjában a fekete lyuktól mért távolsága rajzolja ki. Ahol a felület lefelé hajlik, az *Endurance* gravitációs

27.5. ábra.



Az *Endurance* kritikus pályája a vulkán peremén. A peremen kívül a centrifugális energia és erő, míg azon belül a gravitációs energia és erő a meghatározó.

⁷⁶ Valójában kétféle energiáról van csak szó. Az egyik a gravitációs (potenciális) energia, a másik pedig a mozgási vagy kinetikus energia. Az utóbbiban szereplő sebesség felbontható két összetevőre, egy sugárirányú és egy arra merőleges, ún. tangenciális komponensre. A magyar szaknyelv nem is ismeri a centrifugális energia fogalmát. Ennek ellenére így fogunk rá hivatkozni, hogy követhessük az eredeti szöveg logikáját. (A fordító megjegyzése)



27.6. ábra.

Az *Endurance*-re ható gravitációs és centrifugális erők, illetve azok változása a Gargantuától mért távolság függvényében

és centrifugális energiájának összege csökken, így radiális kinetikus energiájának nőnie kell (mivel az összenergia állandó), azaz a sugárirányú mozgásának fel kell

gyorsulnia. Pontosan ez történik az intuitív vulkán-analógiánkban is.

A 27.3. ábra mélyedésén kívül a felület magasságát az *Endurance* negatív gravitációs energiája határozza meg (lásd a „gravitációs energia” címkével megjelölt területet az ábrán). Itt a pozitív centrifugális energia elhanyagolható. A kráter közepén elhelyezkedő vulkáncsúcson éppen ellenkező a helyzet, itt a növekvő, a gravitációsat felülmúló centrifugális energia határozza meg a magasságot. A vulkán belsejében, a Gargantua horizontjának közelében a gravitációs energia olyan nagy negatív értékre nő, hogy újra legyőzi a centrifugális energiát, így a felület ismét lefelé hajlik (27.5. ábra). A kritikus pálya a vulkán peremén húzódik.

Kritikus pálya: A centrifugális és a gravitációs erők közötti egyensúly

Ideális esetben a vulkán peremének elérése után az *Endurance* állandó nagyságú sebességgel körbe-körbe járna azon. Mivel se befelé, se kifelé nem mozdul el, a befelé ható gravitációs erőt pontosan ellensúlyoznia kell a hajó gyors keringése miatti, kifelé ható centrifugális erőnek.

Valójában ez is a helyzet, ahogyan azt a 27.6. ábra mutatja, amely a Miller bolygója körüli mozgás egyensúlyát tárgyaló 17.2. ábra megfelelője. Az *Endurance* kritikus pályáján a vörös görbe (a hajóra befelé ható gravitációs erő) és a kék görbe (a kifelé mutató centrifugális erő) metszi egymást, így ott a két erő egyensúlyban van. Ez azonban instabil egyensúlyi helyzet, amint az a

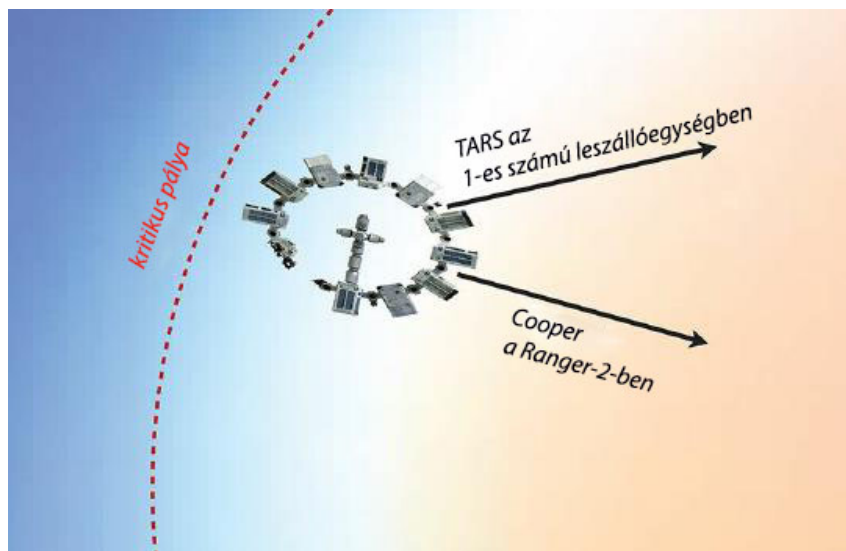
vulkán-analógiánk alapján is belátható⁷⁷. Ha az *Endurance* véletlenszerűen egy picit beljebb mozdul, akkor a gravitációs erő felülmúlja a centrifugális erőt (a vörös görbe a kék fölé kerül), így az eredő az *Endurance*-t befelé, a Gargantua horizontjának irányába húzza. Ha a hajó kicsit kifelé mozdul el, akkor viszont a centrifugális erő győz a gravitációs erővel szemben (a kék görbe kerül a vörös fölé), így az *Endurance* az eredő kifelé tolja, megszabadítva a Gargantua halálos öleléséből.

Ezzel éppen ellenkezőleg - amint azt a 17. fejezetben láttuk -, Miller bolygójának pályáján a gravitációs és a centrifugális erők közötti egyensúly stabil.

Katasztrófa a peremen: TARS és Cooper katapultálása

Tudományos értelmezésem szerint a vulkán pereme nagyon vékony, így a kritikus pálya a peremen rendkívül instabil. Bármilyen kis hiba a navigációban az *Endurance*-t a Gargantuába taszíthatja (bele a vulkánba) vagy eltávolíthatja attól (a mélyedés felé).

A pontatlanságok elkerülhetetlenek, így az *Endurance* pályáját folyamatosan korrigálni kell egy jól megtervezett, visszacsatoláson alapuló vezérlőrendszerrel, amely hasonlít a gépkocsik sebességtartó rendszeréhez (tempomat), csak annál jóval bonyolultabb.



27.7. ábra

Az 1-es számú leszállóegység és a Ranger-2 kilövése után az *Endurance* a rakéták begyűjtésével a tér vissza a kritikus pályára.

⁷⁷ A vulkánperem és az erők egyensúlya közötti analógia egy kulcsfontosságú ténynek köszönhetően alkalmazható: az *Endurance*-re ható eredő erő (a gravitációs és a centrifugális összege) arányos az energiafelület (27.3. és 27.7. ábra) meredekségével. Meg tudjuk mondani, miért?

Úgy képzelem, hogy ez a visszacsatoló rendszer nem működik elég jól, ezért az *Endurance* veszélyesen mélyre kerül a vulkánkürtő belsejében, és a hajtóművek minden mozgósítható tolóerejére szükség van, hogy visszaemeljék a kritikus pályára.

Ez azonban nagyon bonyolult és túlságosan szakszerű lett volna az akciódus jelenetekhez, és unalmas a várhatóan vegyes közönségnek, így Christopher Nolan egy sokkal egyszerűbb, direkter megoldást választott.



27.8. ábra.

A Gargantua felé ereszkedő Ranger-2 az Endurance-en maradt Brand szemszögéből, az előtérben az Endurance két moduljának részleteivel. A Ranger a kép alsó részének közepén, a Gargantua akkréciós korongjával övezett halvány objektum.

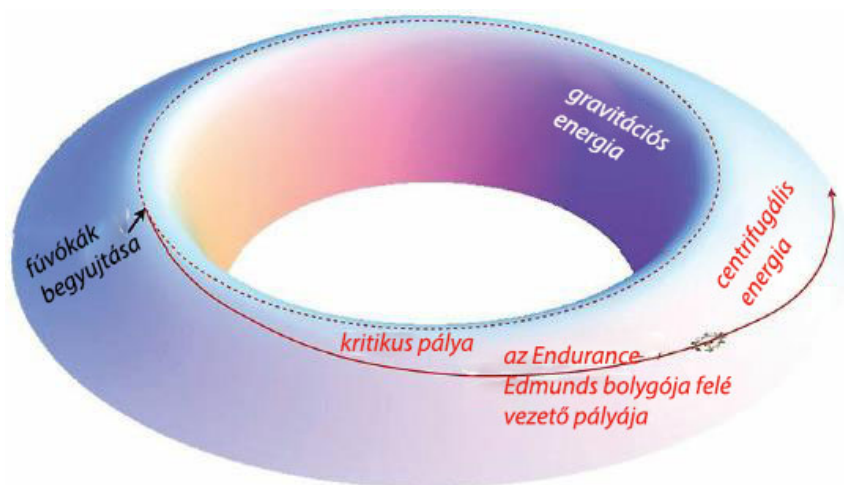
Egy szó se hangzott el az instabilitásról és a visszacsatolásról. Az *Endurance* egyszerűen túl közel került a Gargantua-hoz, amire Cooper az összes rendelkezésére álló tolóerő bevetésével reagált, hogy visszarántsa a hajót a Gargantua markából.

Az eredmény ugyanaz: a TARS által irányított 1-es számú leszállóegység és a Cooper által vezetett Ranger-2 még az *Endurance*-hez kapcsolva begyűjtötték a rakétaikat és kiszabadították a hajót a Gargantua gravitációs öleléséből. Az utolsó lökést a leszállóegység és a Ranger-2 rögzítéseinek lerobbantásával adták meg. A levált leszállóegység és a Ranger TARS-szal és Cooperrel a fedélzetükön a Gargantuába zuhannak, az *Endurance* pedig megmenekül (27.7. és 27.8. ábra).

A filmben tragikus búcsúbeszélgetés zajlik Brand és Cooper között. Brand nem érti, hogy miért kell a leszállóegységgel és a Rangerrel TARS-nak és Coopernek is a fekete lyukba zuhannia. Cooper

ügyetlen, ugyanakkor poétikus választ ad neki: „Newton harmadik törvénye. Az emberek azt hiszik, ha szökni akarnak valahonnan, hátra kell hagyniuk valamit.”⁷⁸

Ez kétségtelenül igaz. Az a plusz tolóerő, amit az jelent, hogy TARS és Cooper is a leszállóegységben, illetve a Rangerben van. rettentően kicsi. A valódi ok természetesen az, hogy



27.9. ábra.

Az Endurance kritikus pályáról Edmunds bolygója felé vezető trajektóriája.

Cooper a Gargantuába akar jutni. Azt reméli, hogy a Gargantua belsejében lévő szingularitásból megismerhetik a kvantumgravitáció törvényeit, és valahogyan visszajuttathatják az információt a Földre. Ez az utolsó, egyetlen reményük az emberiség megmentésére.

Az Endurance indulása Edmunds bolygója felé

A kritikus pálya ideális hely Brand és a robot, CASE számára, hogy az Endurance-t tetszőleges irányba elindítsák, akár Edmunds bolygója felé is.

⁷⁸ Ez a mondat már rádióon hangzik el, és nem Cooper, hanem TARS mondja. *(A fordító megjegyzése)*

De hogyan határozzák meg az indulás irányát? Mivel a kritikus pálya nagyon instabil, a rakéták rövid begyújtása is elég, hogy az *Endurance* letérjen róla.

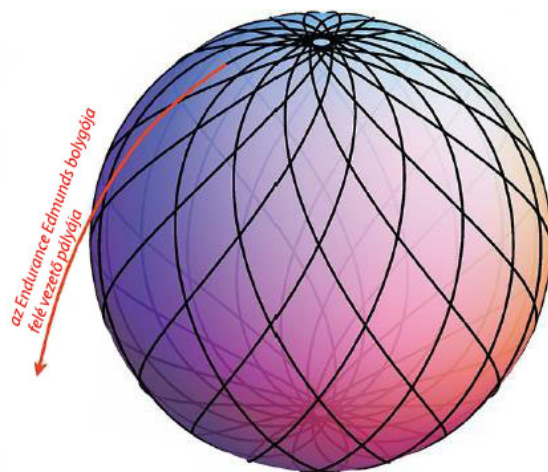
Ha a fúvókákat a kritikus pálya pontosan megfelelő helyén és a megfelelő erővel működtetik, azok pontosan a kívánt irányba fogják indítani az *Endurance*-t (27.9. ábra).

A 27.9. ábra nem feltétlenül győz meg bennünket arról, hogy Brand és CASE valóban el tudnak indulni abba az irányba, amerre szeretnének. Ennek oka az, hogy nem mutatja a kritikus pálya háromdimenziós struktúráját.

Ezt a 27.10. ábrán láthatjuk.

A felcsavarodott kritikus pálya a Gargantua tűzburkában átmenetileg csapdába esett fénysugarak trajektóriáinak (6.5. és 8.2. ábra) közeli megfelelője. A fénysugarakhoz hasonlóan az *Endurance* is átmeneti csapdába esett a kritikus pályán. A fénysugaraktól eltérően az *Endurance*-nek azonban vannak rakétái és vezérlőrendszere, így a kritikus pályáról történő letérés Brand és CASE döntésén múlik. A pálya háromdimenziós csavart szerkezete miatt pedig tetszőleges indulási irány lehetséges.

Távozásukkal magukra hagyták Coopert és TARS-t, akik a fekete lyuk horizontja felé zuhannak, egyenesen a Gargantua szingularitásába.



27.10. ábra.

Az Endurance kritikus pályájának és az Edmunds bolygója felé vezető trajektóriájának háromdimenziós képe. A kritikus pálya a Gargantuát övező gömbfelszínen fut.

28. Zuhanás a Gargantuába

Egy személyes történet



Amikor 1985-ben Carl Sagan hősnőjét, Eleanore Arrowwayt (Jodie Foster) egy fekete lyukon keresztül akarta a Vega csillaghoz küldeni, az mondtam neki, hogy *NE!* A fekete lyukban meg fog halni. A közepén található szingularitás darabokra fogja szaggatni. Azt javasoltam, hogy utaztassa dr. Arrowwayt inkább egy féregjáraton keresztül (14. fejezet).

2013-ban ezzel szemben arra biztattam Christopher Nolant, hogy küldje Coopert a Gargantua fekete lyukba.

Mi történt az 1985 és 2013 közötti negyedszázadban? Miért változott meg ilyen drámaian hozzáállásom a fekete lyukba zuhanással kapcsolatban?

1985-ben mi, fizikusok úgy véltük, hogy minden fekete lyuk magját kaotikus és romboló BKL-szingularitások népesítik be, és mindent, ami a fekete lyukba hullik, elpusztítanak a szingularitások okozta deformációk (26. fejezet). Teljesen megalapozott feltételezésnek gondoltuk. Tévedtünk.

Az elmúlt negyed évszázadban matematikai úton két további szingularitástípust is felfedeztek a fekete lyukak belsejében: ezek a szelíd szingularitások, már amennyiben egy szingularitás lehet szelíd (26. fejezet). Legalább annyira szelíd, hogy a belezuhanó Cooper esetleg túlélhesse. Bizonytalan vagyok ugyan ennek lehetőségében, de ki tudja. Tudományos-fantasztikus hímben azonban elképzelhetőnek tartom a túlélést.

Az utóbbi huszonöt év során azt is megtudtuk, hogy univerzumunk valószínűleg egy magasabb dimenziós befoglaló tér bránja (21. fejezet). Így elfogadhatónak tartom a befoglaló teret benépesítő lények - hipertér-lények nagyon fejlett civilizációja - létezésének lehetőségét is, akik az utolsó pillanatban megmenthetik Coopert a szingularitástól. Christopher Nolan ezt választotta.

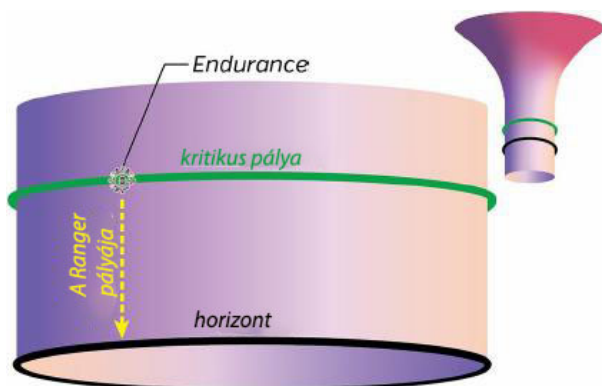
Át az eseményhorizonton



A *Csillagok között*-ben, miután a Cooper által vezetett Ranger-2 (és a TARS által irányított 1-es számú leszállóegység) elvált az Endurance-tól, spirális pályán mozog a Gargantua eseményhorizontja felé, majd át azon. Mit mondanak Einstein relativisztikus törvényei erről a lefelé tartó spirálról?

Ezen törvények szerint - és így az én értelmezésemben is - az Endurance-ból Brand soha nem fogja meglátni, amint a Ranger átlépi az eseményhorizontot. A Cooper által a horizonton belülről neki küldött adások soha nem fognak kijutni. Az idő folyása a horizonton belül lefelé irányuló, ez pedig Coopert és az összes általa küldött jelzést is magával ragadja, távolítja a horizonttól. Lásd az 5. fejezetet!

Akkor mit tapasztal Brand (ha ő és CASE elég hosszú ideig stabilizálni tudja a Endurance-t ehhez)? Mivel mind az Endurance, mind a Ranger mélyen a Gargantua görbült terének hengeres részében van (28.1. ábra), mindkettőt nagyjából ugyanakkora szögsebességgel (ugyanazzal a keringési periódussal) ragadja magával a Gargantua térörvénye. Ezért Brand a saját keringő vonatkoztatási rendszeréből azt látja, hogy a Ranger a leválás után majdnem egyenesen a horizont felé indul (28.1. ábra). Ez látható a filmben is.



28.1. ábra.

A Ranger trajektóriája a Gargantua görbült terében az Endurance keringő vonatkoztatási rendszeréből nézve. Azért, hogy láthassuk, az Endurance képe sokkal nagyobb, mint amekkorának lennie kellene. Kis kép: A Gargantua görbült terének nagyobb

Ahogy a Ranger közelít a horizonthoz, az Einstein-törvények alapján Brandnek azt kell érzékelnie, hogy a Ranger ideje lelassul, majd meg is áll a saját idejéhez viszonyítva. Ennek több következménye is van: Azt látja, hogy a lefelé tartó Ranger egyre lassul, majd a horizont felett megáll. A Rangerről érkező fény pedig egyre hosszabb hullámhosszak (egyre kisebb frekvenciák) felé tolódik el, amíg a Ranger teljesen fekete, és így észlelhetetlen nem lesz. Azok az információmorzsák, amelyeket Cooper a Rangerről a saját idejében egy másodperces időközökkel küld neki, Brand mérései szerint egyre nagyobb időközökkel érkeznek meg. Néhány óra elteltével veszi az utolsó jelet, amelyet Cooper közvetlenül a horizont előtt adott le, és ezzel vége.

Ezzel ellentétben Cooper folyamatosan veszi Brand adásait, még azután is, hogy átlépte a horizontot. Brand jelei akadály nélkül belépnek a Gargantuába, és eléri Coopert. Az ő adása viszont nem juthat ki Brandhez. Einstein törvényei könyörtelenek. Nem lehet másként.

Ezek a törvények ráadásul azt is mondják, hogy Cooper semmi különösét nem tapasztal a horizont átlépésekor. Nem tudhatja, legalábbis egyszerű módon biztosan nem, hogy melyik általa küldött jel az utolsó, amelyet Brand még érzékelni fog. Körbenézve azt sem tudja pontosan megmondani, hol a horizont. Számára semmi sem jelzi azt, ahogyan a földi Egyenlítőt sem jelzi semmi, amikor hajóval áthaladunk rajta.

Brand és Cooper egy másnak látszólag ellentmondó megfigyeléseit két dolog okozza: az időgörbület és az, hogy a fény, illetve az egymásnak küldött üzeneteik terjedési sebessége véges. Ha *mindkettőt* alaposan meggondolom, én semmilyen ellentmondást nem látok.

Szingularitás-szendvicsben



Ahogy Cooper a Rangerrel egyre mélyebbre merül a Gargantuába, maga felett továbbra is látja az univerzumot. A képet számára közvetítő fénysugarakat egy behulló szingularitás hajlítja. Ez először gyenge, de nagyon gyorsan erősödik, ahogyan egyre több anyag hullik a Gargantuába és halmozódik fel egy vékony rétegben (27. fejezet). Ez szintén az Einstein-törvények következménye.

A Ranger alatt egy kirepülő szingularitás van, ezt az az anyag hozta létre, amely jóval korábban hullott a fekete lyukba és visszaszóródott felfelé, a Ranger irányába (27. fejezet).

A Ranger a két szingularitás közé szorult. Elkerülhetetlen, hogy egyik vagy mindkettő eltalálja.

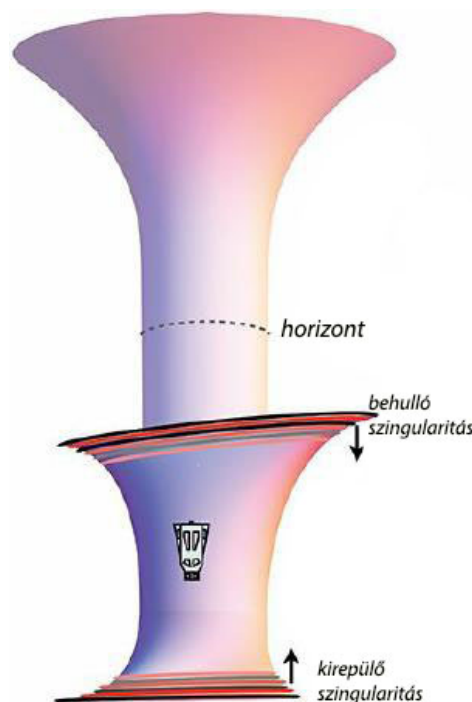
Amikor elmagyaráztam Chrisnek a két szingularitást, ő azonnal tudta, hogy melyiknek kell eltalálnia a Rangért. A kirepülőnek. Miért? Azért, mert Chris már korábban úgy döntött, hogy a filmben eleget tesz a fizika azon törvényeinek, amelyek megakadályozzák, hogy bármely fizikai objektum az időben visszafelé utazzon (30. fejezet).

A behulló szingularitást az az anyag hozta létre, amely jóval Cooper belépése után zuhant a Gargantuába (jóval azután a külső univerzumban mért, például a földi idő szerint). Ha

Cooper találkozik ezzel a szingularitással és túl is éli, az univerzum távoli jövője a múltjában lesz. Olyan távolra kerül a mi jövőnkbe, hogy még a hipertérleányek segítségével sem térhet vissza a Naprendszerbe, csak sok milliárd évvel azután, hogy elhagyta azt, ha egyáltalán visszatérhet, így pedig nem találkozhatna a lányával, Murph-fel.

Ezért Chris úgy döntött, hogy Cooper nem a behulló, hanem a kirepülő szingularitással találkozik, amelyet a Gargantuába a Ranger előtt bezuhanó anyag hozott létre.

Chris választása azonban okoz némi problémát a film tudományos magyarázatában, de nem olyan komolyat, mint a visszafelé utazás az időben. Ha a Ranger a kritikus pályáról közvetlenül



28.2. ábra.

Egy ikon reprezentálja a Gargantua behulló és kirepülő szingularitása közé szorult Rangert. Azért, hogy láthassuk, az ikon sokkal nagyobb, mint amekkorának lennie kellene.

zuhan a Gargantuába, akkor elég lassan mozog ahhoz, hogy a behulló szingularitás utolérje és eltalálja. Ahhoz azonban, hogy a Ranger a kirepülő szingularitással találkozzon, ahogyan Chris akarta, meg kell előznie a behulló szingularitást, amely fénysebességgel zuhan. Ehhez a Rangernek kell egy hatalmas, befelé irányuló löket. Hogyan? A szokásos módon: lendítés egy megfelelő közepes tömegű fekete lyuktól rögtön az Endurance-ról való leválás után.

Mit lát Cooper a Gargantua belsejében?



Zuhanás közben felfelé nézve Cooper a külső univerzumot látja. Mivel zuhanása felgyorsult, úgy érzékeli, hogy a külső univerzum ideje nagyjából a saját idejének ütemében telik⁷⁹, mérete pedig az égbolt feléről durván a negyedére csökkent⁸⁰. Amikor először láttam a filmnek ezt a részét, örömmel állapítottam meg, hogy Paul Franklin és csapata jól csinálta meg, ráadásul még olyasmire is gondoltak, amiről én megfeledkeztem: A filmben a külső univerzum képét a Gargantua akkréciós korongja övezi. Meg tudjuk magyarázni, hogy ennek miért kell így lennie?

Cooper mindezt látja maga felett, nem látja viszont a behulló szingularitást. Az fénysebességgel zuhan feléje, és üldözi azokat a fénysugarakat, amelyek a korong és az univerzum képét előállítják számára, de nem kapja el azokat.

Mivel szinte semmit nem tudunk arról, hogy mi történik egy fekete lyuk belsejében, azt mondtam Chrisnek és Paulnak, én inkább az ő képzelezükre bíznom, hogy Cooper mit lát maga



28.3.ábra

Fent az akkréciós koronggal övezett univerzum, ahogyan Cooper látja a Gargantua belsejében, visszanézve a Ranger törzse mentén. A bal oldali fekete terület a Gargantua árnyéka.

⁷⁹ Szaknyelven kifejezve a fentről érkező jelek a nagy sebessége által okozott Doppler eltolódás miatt vörösödnek, ami kompenzálja a fekete lyuk gravitációs vonzása által okozott kékelvörösödést, így a színek közel normálisak.

⁸⁰ A fény aberrációja következtében.

alatt zuhanás közben. Egy kérésem volt csak: „Ne a Sátán és a pokol tüze legyen, mint a Disney Fekete lyuk című filmjében.” Chris és Paul kuncogtak. Egyáltalán nem kísértette meg őket a gondolat.

Nagyon tetszett, amit alkottak. Lefelé nézve Coopernek az előtte behulló és még mindig zuhanó objektumokról érkező fényt kell látnia. Nem szükséges, hogy ez az általuk kibocsátott fény legyen. A felette lévő akkréciós korong visszavert fényében is láthatja azokat, ahogyan a Holdat is a Nap visszavert fénye miatt látjuk. Úgy gondolom, leginkább csillagközi porról van szó, ez magyarázhatja a filmben a ködöt, amivel zuhanás közben találkozik.

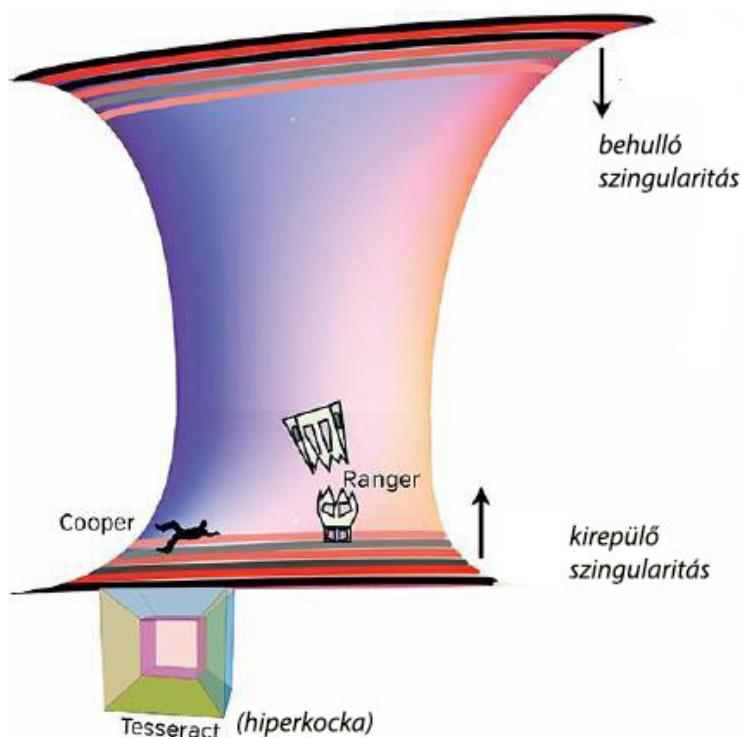
Cooper nála sokkal lassabban hulló anyagot is megelőz. Ez pedig a Rangért eltaláló és arról lepattanó fehér szikrákat magyarázhatja.

A megmentő hiperkocka



Tudományos értelmezésem szerint amint a Ranger megközelíti a kirepülő szingularitást, hatalmas árapályerőkkel szembesül. Cooper még éppen idejében katapultál. Az árapályerők két darabra szakítják a Rangert.

A szingularitás határán Coopert a hiperkocka várja, amelyet feltehetően a hipertérleányek helyeztek ide (28.4. ábra).



28.4. ábra.

A Coopert reprezentáló figura a hiperkockába való belépés előtt a szingularitás szélénél. Azért, hogy láthassuk, a Ranger és Cooper sokkal, de sokkal nagyobb, mint amekkorának lennie kellene. A figurák kétdimenziósak, mivel az ábráról egy tér

29. A hiperkocka

A *Csillagok között*-ben a hiperkocka bejárata egy csak fehér mezőkből álló sakktábla-mintázat. Mindegyik fehér négyzet egy nyaláb vége. A hiperkockába belépve Cooper kábultan és zavarodottan egy nyalábok közötti csatornában zuhan a csatornafal tégláinak tűnő valamik előtt, amelyekről azonban kiderül, hogy könyvek. A csatorna egy nagy kamrába vezet, ahol végül is Cooper visszanyeri egyensúlyát.

A kamra egy négydimenziós hiperkocka háromdimenziós oldala, Christopher Nolan egyedi szemüvegén keresztül, Paul Franklin és a vizuális effektusok részlege által „feltupírozva”. A kamra és környezete figyelemre méltóan összetett. Amikor először láttam, legalább annyira zavarba ejtett, mint Coopert, bár tudom, mi az a hiperkocka. Chris és Paul annyira telezsúfolta, hogy teljesen csak akkor értettem meg, mikor beszéltem velük.

A következőkben azt írom le, amit már korábban is tudtam - és amit ebből tudtam meg, fizikus nézőpontból megszűrve. A sztenderd, egyszerű hiperkockával kezdem, majd felépítem Chris összetett hiperkockáját.

Pont - szakasz - négyzet - kocka - hiperkocka



A sztenderd hiperkocka egy négy térdimenzióban kiterjedő kocka. A 29.1. és 29.2. ábra mutatja, mit is kell ezen érteni.

Tekintsünk egy pontot (29.1. ábra, fent), és mozgassuk egy egyenes mentén (egy dimenzióban), így egy szakaszt kapunk. A szakasznak két „oldala” (vége) van: ezek pontok. A szakasz egydimenziós (egyetlen dimenzió mentén terjed ki), az oldalainak dimenziója eggyel kevesebb: nulla.

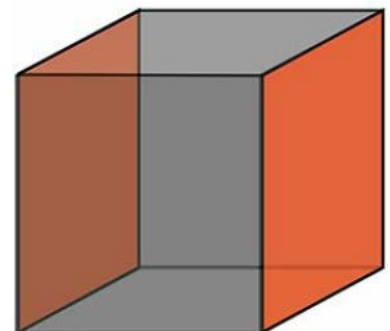
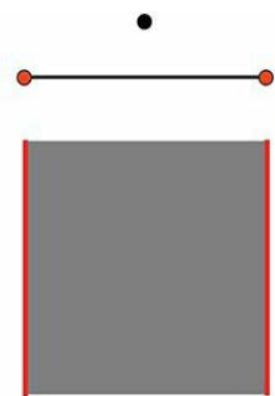
Ha a szakaszt saját magára merőlegesen elmozgatjuk (29.1. ábra, középen), egy négyzetet kapunk. A négyzetnek négy oldala van, ezek szakaszok. A négyzet

kétdimenziós, oldalainak

dimenziója eggyel kevesebb: egy.

Mozgassuk a négyzetet saját magára merőlegesen (29.1. ábra, lent),

így egy kockát kapunk. A kockának hat oldala van,

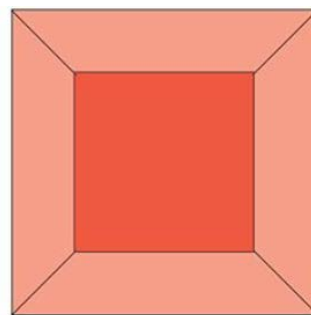


29.1. ábra.

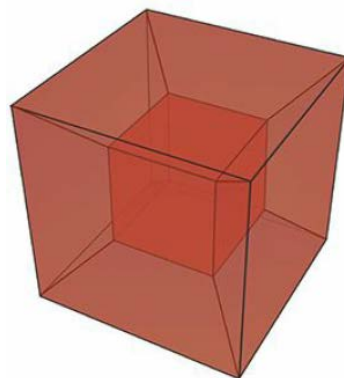
Pontból szakasz, szakaszból négyzet,
négyzetből kocka

ezek négyzetek. A kocka háromdimenziós, oldalainak dimenziója eggyel kisebb: kettő.

A következő lépés magától értetődő, de nehéz megjeleníteni. Úgy kell újrarajzolnom a négyzetet, ahogyan akkor látnánk, ha egyik narancssárga színű oldalához közel elhelyezkedve néznénk (29.2. ábra, fent). Az eredeti négyzetet (kicsi, sötét narancsszínű) - amint felénk mozdítanánk, hogy létrehozzuk a kockát - fel kellene nagyítanunk a kocka előlapjának, a külső négyzetnek a méretére.



Ha veszünk egy kockát és saját magára merőlegesen mozgatjuk (29.2. ábra, lent), hiperkockát kapunk. A hiperkocka megjelenése a kocka segítségével képzelhető el: úgy néz ki, mint két egymásba ágyazott kocka. A belső kifelé kiterjesztve kifeszíti a négydimenziós hiperkockát. A hiperkockának nyolc oldala van, ezek kockák. (Be tudjuk-e azonosítani és megszámlálni ezeket? ⁸¹) A hiperkockának négy térdimenziója van, oldalainak dimenziója eggyel kevesebb: három. A hiperkockának és oldalainak egy idődimenziója is van, ez természetesen nem látható az ábrán.



29.2. ábra

Kockából hiperkocka

A filmben az a kamra, ahol Cooper belép a hiperkockába, annak a nyolc közül egyik, Chris és Paul által leleményesen módosított, összetett kockaoldala. Mielőtt az ő szellemes módosításaikkal foglalkozom, a sztenderd, egyszerű hiperkocka segítségével mutatom be a film ezen jeleneteivel kapcsolatos értelmezésemet.

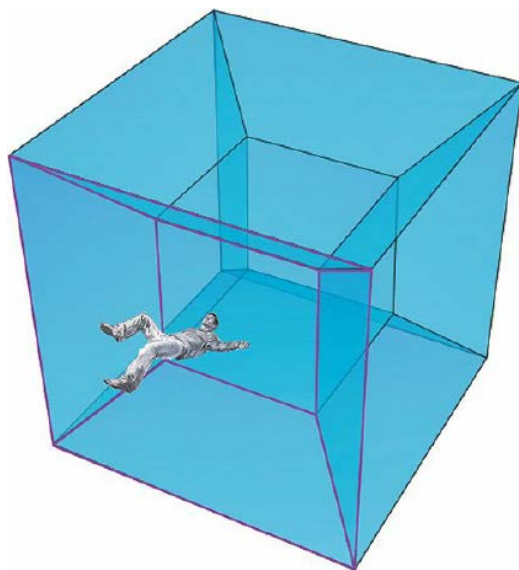
Cooper utazása a hiperkockában



Mivel Cooper atomokból épül fel, amelyeket elektromos és nukleáris erők tartanak össze, ezek pedig csak három tér- és egy idődimenzióban létezhetnek, ő maga a hiperkocka egyik háromdimenziós oldalába (kocka) van zárva. A hiperkocka negyedik térdimenziójáról nem lehet tapasztalata. A 29.3. ábra mutatja lebegését a hiperkocka előlapjában, amelynek éleit bíborszínű vonalakkal emeltem ki.

⁸¹ A világhálón számos animáció érhető el, amelyek segíthetnek a hiperkocka elképzelésében. *(A fordító megjegyzése)*

Értelmezésemben a hiperkocka a szingularitásból emelkedik a befoglaló térbe. Mivel ugyanannyi térdimenziója van, mint a befoglaló térnek (négy), az éppen megfelelő hely neki. A háromdimenziós Coopert háromdimenziós oldalába zárva szállítja a befoglaló téren keresztül.

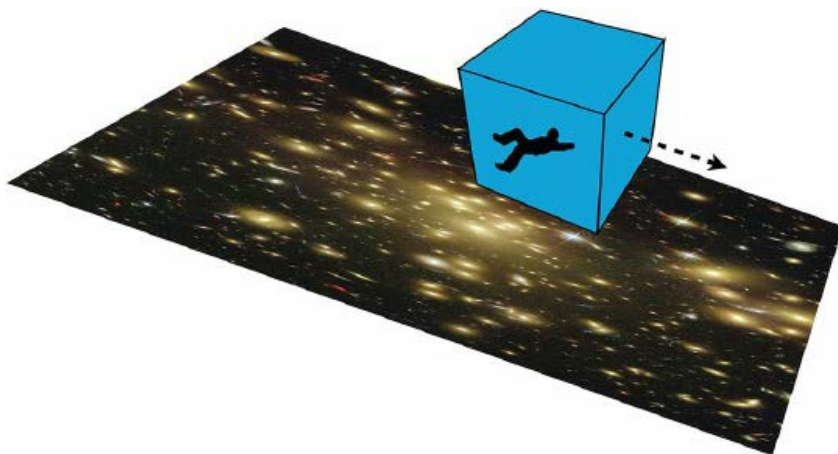


29.3. ábra.

Cooper figurája a hiperkocka háromdimenziós oldalán

Emlékezzünk arra, hogy a Gargantua körülbelül 10 milliárd fényévre van a Földtől, háromdimenziós univerzumunkban, a bránunkban mérve. A befoglaló térben távolsága azonban csak 1 csillagászati egység körüli (ez a Föld távolsága a Napról), lásd a 23.7. ábrát. Így valamilyen, a hipertérleányek által biztosított meghajtással értelmezésem szerint a hiperkocka gyorsan el tudja juttatni Coopert a befoglaló téren keresztül a Földre.

A 29.4. ábra egy pillanatfelvétel az utazásról, amelyről egy térdimenziót elhagytunk, így a hiperkocka egy háromdimenziós kocka a háromdimenziós befoglaló térben. Coopert pedig egy kétdimenziós emberfigura jelképezi a kocka kétdimenziós oldalán, amely párhuzamosan mozog kétdimenziós univerzumunkkal (brán).



29.4. ábra.

Cooper befoglaló téren keresztül, a bránunk felett utazó figurája a hiperkocka egyik oldalán. A képről egy térdimenziót elhagytunk

A filmben látottaknak megfelelően úgy képzelem, hogy ez az utazás nagyon gyors, mindössze néhány percig tart, miközben Cooper még mindig bódult és zuhan. Amint lebegve nyugvó helyzetbe jut a nagy kamrában, a hiperkocka Murph hálósobája mellett köt ki.

Dokkolás: Murph hálósobájának látványa

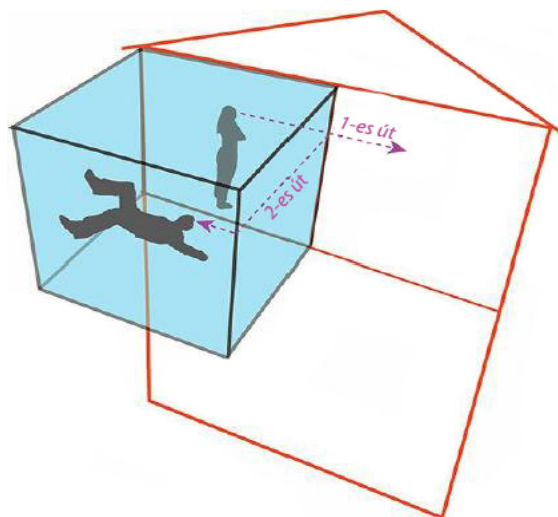


Hogyan történik ez a dokkolás? Értelmezésem szerint a befoglaló térben a Föld közelébe érve a hiperkockának be kell hatolnia a bránunkat burkoló 3 centiméter vastagságú AdS-rétegbe (23. fejezet), hogy elérje Murph hálósobáját. A hiperkockát létrehozó hipertérleányek feltehetőleg ellátták azzal a technológiával, amely utat nyit az AdS-rétegben a behatoláshoz.

A 29.5. ábra a behatolás és a Murph hálósobája melletti dokkolás után mutatja a hiperkockát. Egy térdimenziót ismét elhagytunk, így a hiperkockát egy háromdimenziós kocka reprezentálja, a ház, a hálósoba és Murph pedig kétdimenziósak, ahogyan természetesen Cooper is.

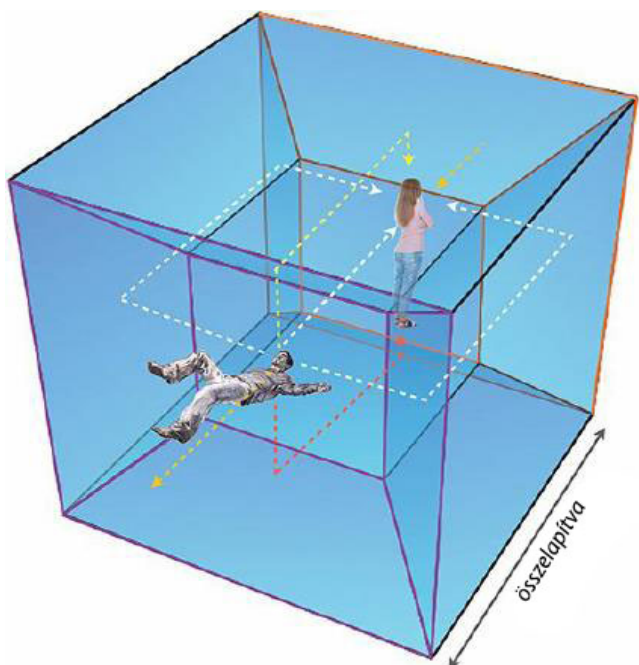
A hiperkocka hátoldala egybeesik Murph hálósobájával. Ezt pontosabban is elmagyarázom.

A hátoldal egy háromdimenziós keresztmetszete a hiperkockának, amely ugyanúgy illeszkedik Murph hálósobájába, mint a gömb körkeresztmetszete a kétdimenziós bránra a 22.2. ábrán, és a hipergömb



29.5. ábra

A Murph hálósobája mellett lehorgonyzott hiperkocka



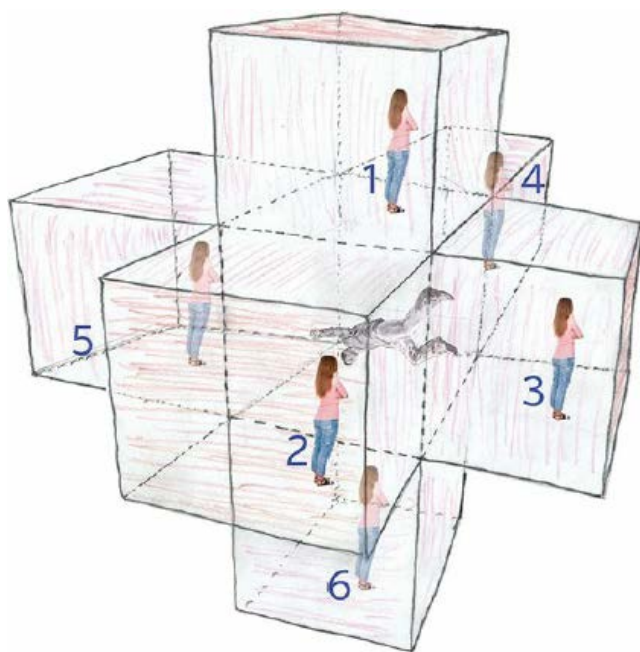
29.6. ábra.

Cooper figurája saját hiperkocka-oldalának [bíbor élek] mind a hat falán be tud nézni Murph hálósobájába [narancssárga élek]. Itt éppen Murph figuráját figyeli

gömbkeresztmetszete a háromdimenziós bránra a 22.3. ábrán. Így Murph hálósobájában minden, beleértve őt magát is, a hiperkocka hátoldalában is benne van.

Ha egy Murphtól induló fénysugár elérkezik a hálósoba és a hiperkocka közös éléhez, két irányban mehet tovább: A sugár bránunkban maradhat és a 29.5. ábrán látható 1-es úton kijut a nyitott ajtón vagy a falba ütközik, majd ott elnyelődik. A sugár azonban a hiperkockában is mehet, a 2-es úton haladva a hiperkocka következő oldalához ér és onnan jut Cooper szemébe. Valójában a fotonok egy része az 1-es úton halad, másik részük pedig a 2-esen, létrehozva így Cooper számára Murph

képét.



29.7. ábra.

Murph hálósobájának hat nézete, ahogyan Cooper ikonja látja saját hiperkocka-oldaláról. (saját vázlatom)

Vessünk most egy pillantást a 29.6. ábrára, ahol visszaállítottam a korábban elhagyott térdimenziót. Amikor Cooper kamrája jobb oldali falán néz át, Murph hálósobájának jobb oldali falán keresztül néz be abba (jobb oldali fehér fénysugár). Kamrájának bal oldali falán átnézve Cooper a hálósoba bal oldali falán át lát be oda (bal oldali fehér fénysugár). A hátsó falon keresztül a hálósoba hátsó falán, az elsőn keresztül (narancssárga fénysugár) pedig a hálósoba első talán nézhet be. (Bár ez utóbbi nem teljesen egyértelmű a 29.6. ábra alapján, meg tudnánk magyarázni, miért van így?) A sárga sugár mentén a hálósoba plafonján keresztül néz lefelé, a vörös mentén pedig a padlóján keresztül felfelé. Ahogyan különböző

irányokba néz, Cooper számára úgy tűnik, mintha Murph hálósobája körül keringene. (Chris így írta le, amikor először mutatta meg összetett hiperkockáját.)

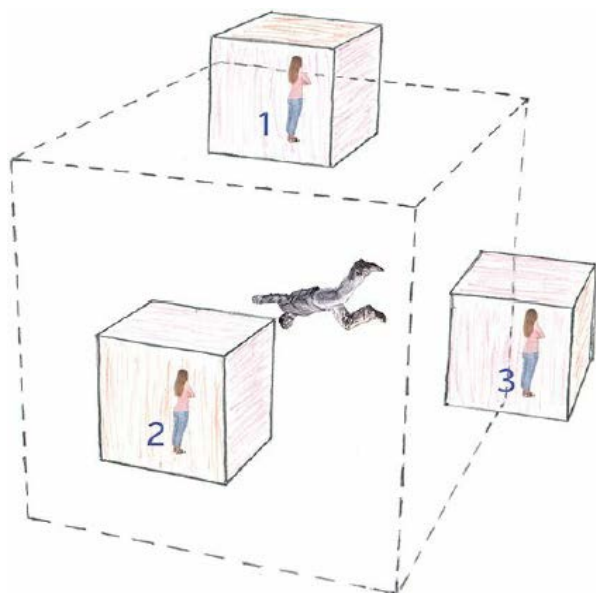
A 29.6. ábrán minden fénysugárnak át kell haladnia köztes kockákon (hiperkocka-oldalakon). mielőtt eléri Murph hálósobáját. A filmben nem tesznek meg észrevehető távolságot Cooper kamrája és a hálósoba között, így Chris és Paul egyik dimenzióban biztosan összenyomta a hiperkockát, lásd a szürke nyilat és „összelapítva” feliratát a 29.6. ábrán.



29.8. ábra

Cooper Nolan összetett hiperkockájában lebeg

Az összenyomás után Cooper kamrájának minden oldala közbeeső tér nélkül, közvetlenül Murph hálósobájának valamelyik oldalával (fal, padló vagy plafon) érintkezik, így Cooper a 29.7. ábrán mutatott helyzetben van. Hat hálósobát lát, mindegyik kamrájának egyik oldalához illeszkedik, de egyébként mindegyik megegyezik, eltekintve arról, hogy milyen irányból látszik⁸². Valójában pontosan ugyanolyanok. Csak egy hálósoba van, bár Cooper hat példányt lát belőle.



29.9. ábra.

A hat hálósoba Cooper háromszorosra nagyított kamrájának oldal-közepeit foglalja el.

Chris bonyolult hiperkockáját, hogy Cooper kamrájának mérete háromszorosára nőtt, így a falaihoz csatlakozó hálósobák csak a falak harmadát foglalják el. A helyzetet a 29.9. ábrán

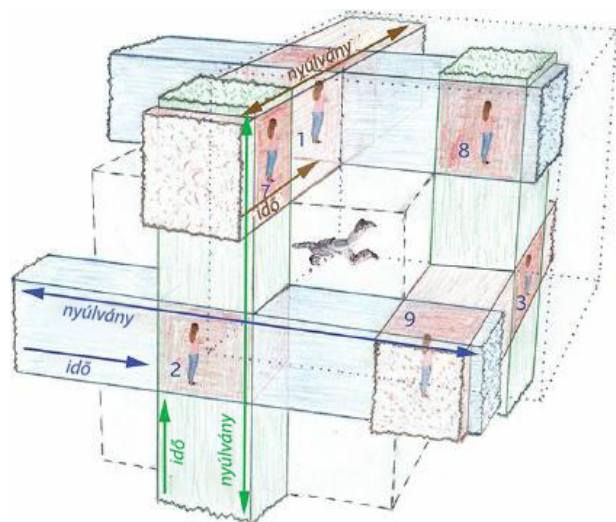
Nolan összetett hiperkockája



A 29.8. ábra egy állókép a filmből, a hiperkocka belsejében lévő kamrájában lebegő Coopert mutatja. Nagyon különbözik a 29.7.

ábrától, a Chris által kigondolt és Paul csapata által megvalósított gazdag és összetett módosításoknak köszönhetően.

Az első, amit észrevettem, amikor megláttam



29.10. ábra.

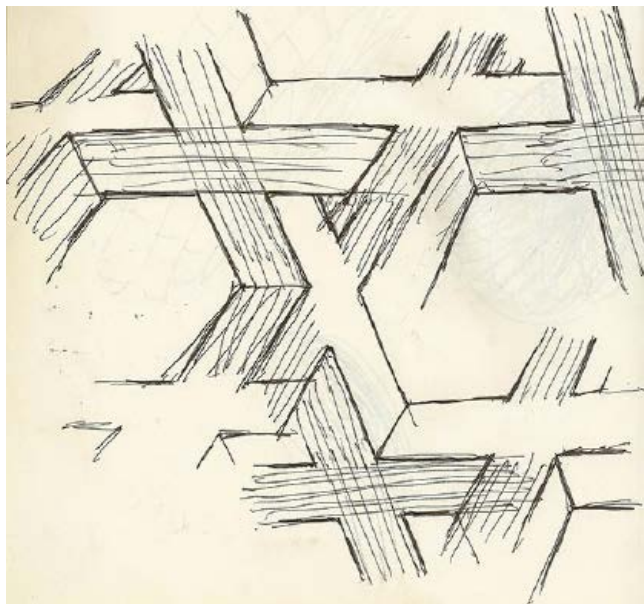
Mindegyik hálósoba mellett nyúlványok vannak, amelyek mentén az idő múlik. (saját vázlatom)

⁸² A 29.7. ábrán Cooper úgy fordult át, hogy Murph feje búbját látja, mint a 29.6. ábrán is. Ez azt követelné, hogy a 2., 3., 4. és 5. fal képein Murphnek is fejjel lefelé kellene lennie. Azonban az, hogy négy képen fejjel lefelé van, a maradék kettőn pedig egyenesen, megzavarhatta volna a nézőket, így a falak képeit sem in, sem a hímben nem fordítottuk meg.

mutatom, a hiperkocka minden egyéb részletét elhagyva és a kamra három hátsó falát is elrejtve⁸³.

A második dolog, ami szembetűnt, a hálósobákból Cooper kamrájára merőlegesen mindkét irányba kilógó nyúlványok (29.10. és 29.11. ábra). Chris és Paul magyarázata szerint ahol ezek a nyúlványok metszik egymást, ott egy hálósoba van, például a 7-es, 8-as és 9-es, vagy az eredeti 1-6 hálósobák.

A nyúlványok hossza határozatlan, metszeteik látszólag hálósobák és Cooperéhez hasonló kamrák⁸⁴ (szaggatott élek a 29.10. ábrán) végtelen rácsát hozzák létre. Például a 7-es, 8-as és 9-



29.11. ábra.

Nyúlványok hálózata, ahogyan Christopher Nolan a jegyzetfüzetébe rajzolta az összetett hiperkocka koncepciójának fejlesztésekor

es hálósobák számozott oldalai a pontozott élű kamrába néznek. Ennek bal alsó hátsó sarka egybeesik Cooper kamrájának jobb felső első sarkával.

⁸³ A filmben Murph hálósobája nem kocka, hanem téglatest alakú, hosszúsága 6. szélessége 4,5, magassága pedig 3 méter. Cooper kamra járnak minden mérete háromszor nagyobb, azaz 18, 13.5 és 9 méter. Az egyszerűség kedvéért azonban mind a hálósobát, mind a kamrát kockának ábrázoltam.

⁸⁴ Chris és Paul a kamrákat "üregeknek" hívja, mivel olyan tartományok, amelyeken nem halad keresztül nyúlvány.

A nyúlványok, valamint a hálósobák és kamrák hálózatának jelentéséhez TARS szolgáltatja a kulcsot, amikor ezt mondja Coopernek: „Látta, hogy az idő itt fizikai dimenzióként jelenik meg.”

Chris és Paul alaposan elmagyarázták nekem. A hipertérleányek a kék nyúlványok

esetében a 29.10. ábrán kék nyilakkal jelzett irányokban folyva

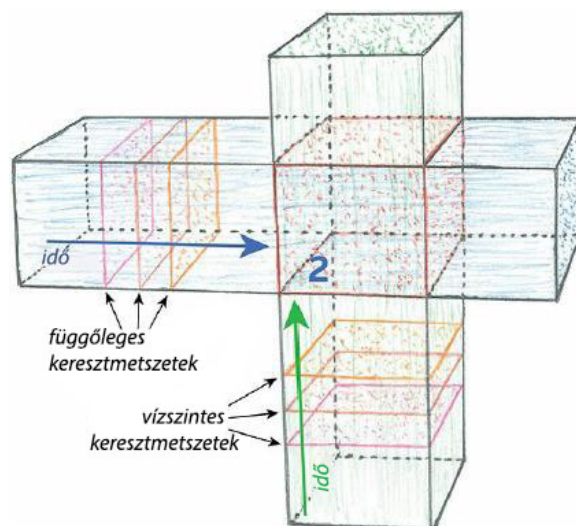
jelenítik meg az időt. ugyanígy a zöld és a barna nyúlványokra is.

Azért, hogy ezt jobban megértsük, koncentráljunk csak a 2-es hálósobát kimetsző nyúlványpárra a 29.12. ábrán. A képen a függőleges keresztmetszetek az idő múlásával jobbra haladnak, a kék nyíl mentén, miközben létrehozzák a kék nyúlványt.

Hasonlóan, a vízszintes keresztmetszetek az idő múlásával felfelé haladnak, a zöld nyíl mentén, a zöld nyúlványt létrehozva. Ahol a két keresztmetszethalmaz találkozik - ahol a nyúlványok metszik egymást ott van egy hálósoba.

Ugyanez igaz minden nyúlványra. Két nyúlvány minden metszésénél a keresztmetszeteik létrehoznak egy hálósobát.

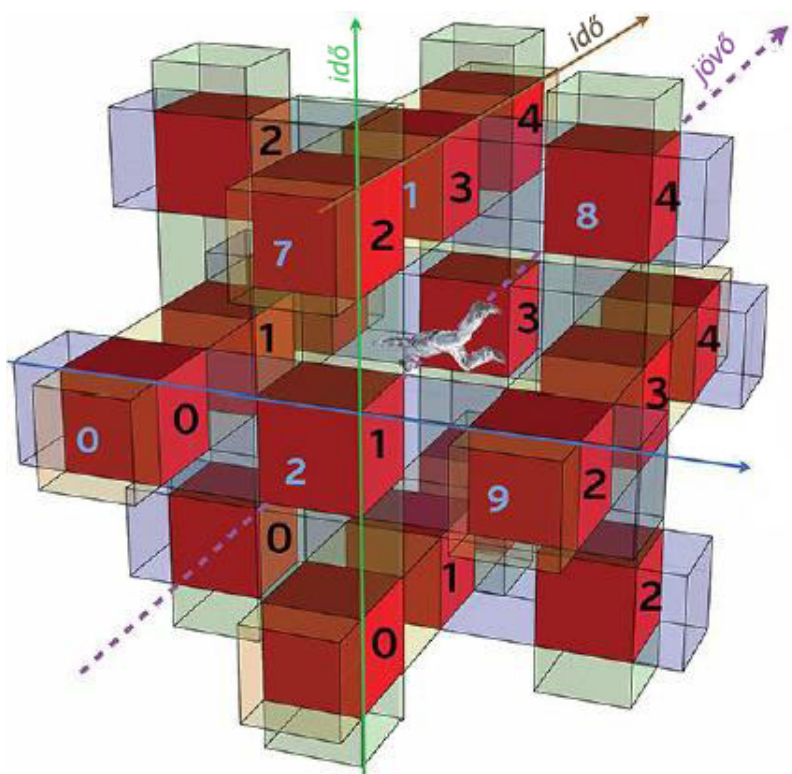
A keresztmetszetek véges sebessége miatt a különböző hálósobák ideje nincs szinkronban egymással. Ha például a keresztmetszeteknek egy másodpercig tart, amíg a nyúlvány mentén egyik hálósobától a következőig érnek, akkor a 29.13. ábra minden hálósobája a 0-s jövőjében van, mégpedig annyi másodperccel, amennyit a rá írt fekete szám mutat. Például a 2-es szoba egy másodperccel van a 0-s előtt, a 9-es kettővel, a 8-as pedig négy másodperccel. Meg tudjuk magyarázni, miért?



29.12. ábra.

Murph hálósobájának keresztmetszetei két folyosó mentén mozogva. A 2-es hálósoba ott helyezkedik el, ahol a keresztmetszetek keresztezik egymást.

A filmben az egymást követő hálósobák ideje közti különbség közelebb van a tized másodperchez, mint az egyhez. A szomszédos hálósobák alapos megfigyelésével, miközben a szél Murph hálósobájának ablakán lengeti a függönyöket, mi magunk is megbecsülhetjük az időeltérést.



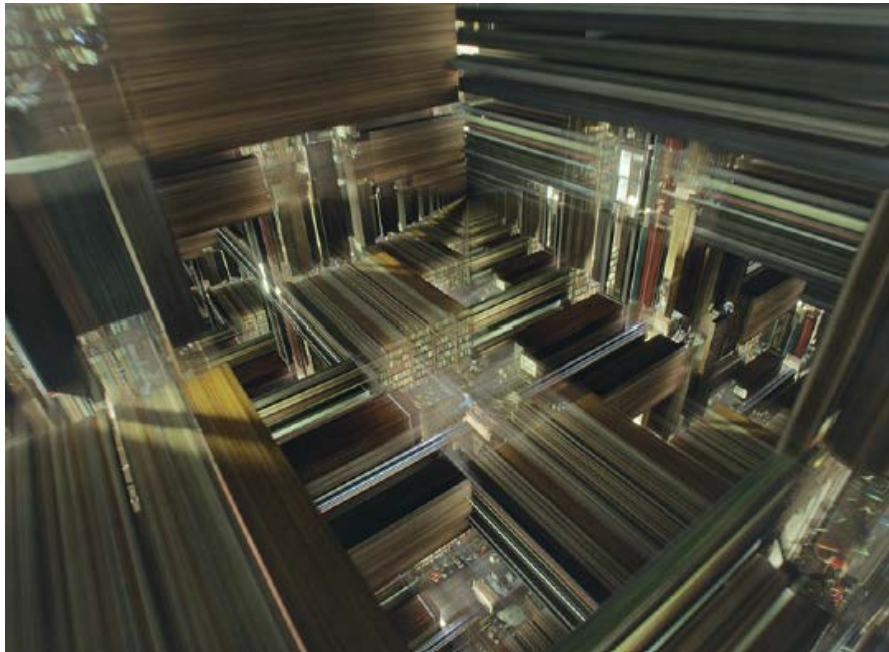
29.13. ábra.

A mozgó keresztmetszetek (nyúlványok) kereszteződéseiként létrejött hálósobák hálózata. A kék számok az előző ábrák számozási rendszerének kiterjesztéseként speciális szobákat azonosítanak. A fekete számok mindegyik hálósobában azt jelzik, hogy az a 0-s hálósobához képest mennyire van a jövőben. A lila szaggatott nyíl az az irány, amely mentén Cooper leggyorsabban mozoghat a hálósoba jövőjébe.

Természetesen a filmbeli hiperkocka minden hálósobája Murph valódi hálósobája egy adott pillanatban, amelyet a 29.13. ábrán a fekete szám mutat.

Cooper sokkal gyorsabban tud mozogni, mint ahogyan az idő telik a hálósobákat összekötő nyúlványokban. Így a hiperkocka-komplexumban annyi hálósobaidőbe tud eljutni, amennyibe csak akar!

Leggyorsabban úgy juthat Murph hálósobájának jövőjébe, ha kamrájában átlósan mozog a kék, zöld és barna idő növekvő irányában (jobbra, tel és befelé), a 29.13. ábrán lila szaggatott vonallal jelzett átló mentén. Az átlók mentesek a nyúlványokról, nyitott csatornák, amelyek mentén Cooper szabadon mozoghat. A filmben láthatjuk, amint egy ilyen nyitott csatorna



29.14. ábra.

Ezt látja Cooper, amint a hiperkocka-komplexum átlós csatornájában gyorsan utazik Murph hálósobájának jövőjébe. Az átlós csatorna a kép felső részének közepén van.

mentén jut el az első kísérteties könyvleesések hálósobaidejéből a karóraketyegés hálósobaidejébe.

Cooper tényleg előre-hátra utazik az időben, amint a komplexumban átlósan fel-le mozog? Előre-hátra abban az értelemben, ahogyan a hipertérleányek tudnak Amelia Brand szerint, amikor ezt mondja: "Számukra talán az idő is csak egy fizikai dimenzió. Nekik lehet, hogy a múlt olyan, mint egy kanyon, amibe leereszkedhetnek, a jövő pedig egy hegy, amit megmászhathatnak. De nekünk nem az, érti?"

Lássuk, milyen szabályok irányítják az időutazást a *Csillagok között*-ben.

30. Üzenet a múltba

A szabályok közvetítése a film nézői számára



Mielőtt Christopher Nolan a *Csillagok között* rendezője lett és újraírta a forgatókönyvet, testvére, Jonah tájékoztattott a szabályokról.

Azért, hogy egy tudományos-fantasztikus filmben fenntartsuk a kívánt feszültséget, Jonah magyarázata szerint a nézőkkel közölni kell a játékszabályokat, a film „szabályrendszerét”. Mit engednek meg és mit tiltanak a fizika törvényei és a kor technológiai fejlettsége? Ha a szabályok nem világosak, akkor a közönség nagy része a főhőst megmentő, hirtelen felbukkanó csodákra vár, a feszültség pedig a kíváncsiság szint alá csökken.

Természetesen nem mondhatjuk azt a közönségnek, hogy „Ezek a film szabályai...” Ezeket finoman és természetes módon kell a tudomására hozni. Chris pedig mestere ennek. Szabályait a szereplők párbeszédein keresztül ismerteti. A következő alkalommal, amikor a kedves olvasó megnézi a filmet (egyáltalán, hogyan lehetséges, hogy nem nézte meg még egyszer?), figyeljen a szabályközlő dialógusok beszédes részeire.

Christopher Nolan időutazással kapcsolatos szabályai



Kiderül (lásd alább), hogy az időben visszafelé utazást a kvantum-gravitáció törvényei irányítják, ami csaknem teljesen ismeretlen terület, így még mi, fizikusok sem vagyunk biztosan benne, mi lehetséges és mi nem.

Chris a lehetséges és a tiltott időutazással kapcsolatban két szabályt alkotott, ezek a következők:

1. SZABÁLY:

A háromdimenziós fizikai objektumok és mezők, mint például az emberek és a fénysugarak, illetve az utóbbiak által hordozott információ nem utazhatnak bránunk egyik helyétől a másikig időben visszafelé. Ezt a fizika törvényei és a téridő tényleges görbülete nem engedik. Ez igaz azokra az objektumokra, amelyek örökre a bránunkban maradnak, de azokra is, amelyek egy hiperkocka háromdimenziós oldalában a befoglaló téren keresztül utaznak bránunk egyik pontjából egy másikba. Azaz Cooper soha nem utazhat vissza a saját múltjába.

2. SZABÁLY:

A gravitációs erők eljuttathatnak üzeneteket a bránunk múltjába.

A filmben az első szabály állandó feszültséget okoz. Murph egyre öregebb lesz, míg Cooper a Gargantua közelében időzik. Miután nem lehetséges az időben visszafelé utazni, semmi esélye arra, hogy már felnőtt lányával valaha is találkozzon.

Reményt a második szabály adhat Coopernek. Reményt, hogy a gravitációt használva kvantuminformációt juttathat vissza a fiatal Murph korába, aki így megoldhatja a professzor egyenletét, és kitalálhatja, hogyan lehet az emberiséget a Földről a világűrbe juttatni.

Hogyan működnek ezek a szabályok a *Csillagok között*-ben

Üzenet Murphnek



A hiperkockába belépve és abban mozogva Cooper a bránunk idejéhez képest valóban visszafelé utazik, abból a korszakból, amikor Murph már idős hölgy, abba az időszakba, amikor még csak tízéves. Teszi ezt abban az értelemben, hogy a hiperkocka hálósobáiban a tízesztendős Murphöt látja. Bránunk idejéhez (hálósobaidő) képest előre-hátra tud mozogni, ismét csak abban az értelemben, hogy más hálósobát választva más időben látja Murphöt. Ez nem sérti az 1-es szabályt, mivel Cooper nem tért vissza a bránunkba. Kívül marad azon, a hiperkocka háromdimenziós csatornájában, és Murph hálósobájába a Murphtól hozzá érkező, időben előrehaladó fénysugarak segítségével pillant be.

De ahogyan Cooper nem tud visszalépni a bránunkba abban az időben, amikor Murph még csak tízéves, fényjelet sem tud küldeni neki. Ez sértené az 1. szabályt. A fényjel információt juttatna el hozzá Cooper múltjából, ami viszont már az ő jövője, időben visszafelé haladó információt bránunk egyik pontjából a másikba abból a korszakból, amikor ő már öreg. Lennie kell tehát egy félig áteresztő tükörhöz vagy egy fekete lyuk eseményhorizontjához hasonló egyirányú téridő-sorompónak a hálósobájában tartózkodó tízéves Murph és a hiperkockában lebegő Cooper között. Murphtól Cooperig eljuthat a fény, fordítva azonban nem.

Tudományos értelmezésem szerint az egyirányú sorompónak nagyon egyszerű oka van: A hiperkockában Cooper folyamatosan a tízéves Murph jövőjében van. A fény az időben előrehaladva eljuthat Murphtól hozzá, tőle Murphhoz azonban nem, mert az csak időben visszafelé lenne lehetséges.

Cooper azonban rájön, hogy a gravitáció leküzdheti ezt az akadályt. Gravitációs jelek utazhatnak tőle Murphig az időben visszafelé. Ezt először akkor látjuk, amikor Cooper kétségbeesetten próbálja lelökni a könyveket Murph könyvespolcáról. A 30.1. ábra a film ezen jelenetéből mutat egy állóképet.

Azért, hogy elmagyarázhassam ezt a képet, egy kicsit vissza kell térni a hálósobák nyúlványaira annak alapján, amit Chris és Paul elmondott nekem. Fókuszáljunk a 29.10. és a 29.12. ábrák előterében látható kék nyúlványra, amelyet a felesleges részeket elhagyva újra megrajzoltam a 30.2. ábrán. Idézzük fel, hogy ez a nyúlvány Murph hálósobájának függőleges keresztmetszeteiből áll, amelyek a hálósoba idejében előre, a kék irányban (jobbra) haladnak.

A hálósobában minden tárgy, például minden könyv hozzájárul a hálósoba nyúlványához. Valójában a könyvnek saját nyúlványa van, amely a kék nyíl mentén időben előrehalad a szoba nagyobb nyúlványának részeként. Mi, fizikusok a nyúlványnak ezt a változatát a könyv „világcsövének” hívjuk. A könyv anyagát alkotó részecskék nyúlványait pedig „világvonálnak”. A könyv világcsöve tehát a könyvet alkotó részecskék világvonalainak kötege. Chris és Paul ugyanezt a nyelvet használja. A filmben látható, a nyúlványok mentén futó vékony vonalak a Murph hálósobájának anyagát alkotó részecskék világvonalai.

A 30.1. ábrán Cooper öklével újra és újra a könyv világcsövére üt, gravitációs erőt létrehozva így, amely időben visszafelé halad addig a pillanatig, amikor éppen a hálósobába néz, majd meglöki a könyv világcsövét. Az válaszul megmozdul. Cooper számára a cső mozgása, ami egy balra lefelé haladó hullámmá válik (30.2. ábra)⁸⁵, azonnali reakciónak tűnik az ütlegetésére. Ha a mozgás kellően erős, a könyv leesik a polcról. Mire Cooper megkapta TARS-tól a kvantuminformációt, tökélyre fejlesztette a kommunikációnak ezen formáját. A filmben látjuk, amint ujjaival a karóra másodpercmutatójának világcsövét nyomkodja. Ezzel időben visszafelé haladó gravitációs erőt hoz létre, amellyel a másodpercmutatót morzejelei generálva rángatja, így továbbítva a kvantuminformációt. A hiperkocka a rángatás mintázatát a befoglaló térben tárolja, így újra és újra ismétli azt. Amikor három évtized múlva a már negyvenéves Murph visszatér a hálósobájába, a másodpercmutató még mindig „tikkel”, újra és újra ismételve a kvantuminformációt, amelynek elküldéséért Cooper olyan keményen küzdött.

⁸⁵ Miért balra? A hálósoba idejében a cső minden pillanatban ugyanabban az átlós helyzetben van. Gondoljunk bele!

Hogyan működik az időben visszafelé ható gravitációs erő? Miután elmeséltem, hogy mit



30.1. ábra

Cooper egy könyv világcsövét ütögeti jobb kezével.

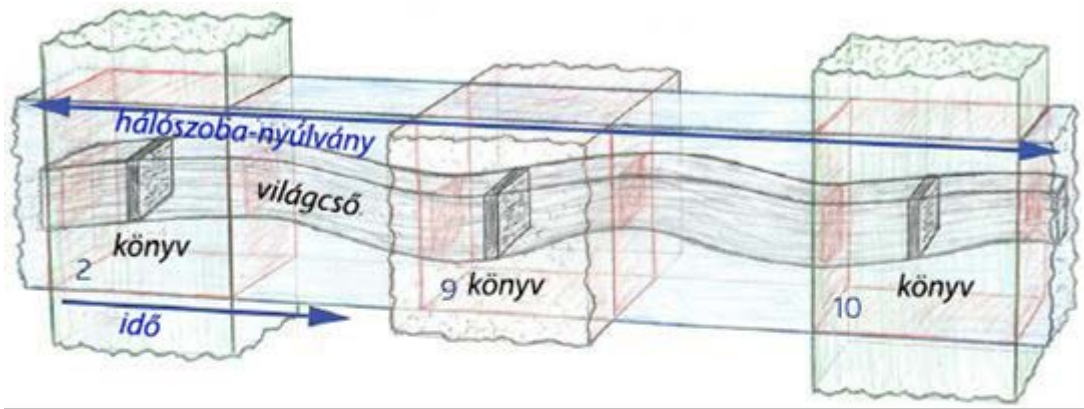
tudok, illetve mit vélek tudni az időben visszafelé történő utazásról, az ezzel kapcsolatos fizikusi értelmezésemet is leírom.

Időutazás befoglaló tér nélkül: Amit igaznak vélek



1987-ben, Carl Sagan hatására (14. fejezet) egészen érdekes dologra jöttem rá a féregjáratokkal kapcsolatban. Ha a fizika törvényei megengedik a féreglyukak létezését, akkor Einstein relativisztikus törvényei alapján azok időgépekké alakíthatók. Ennek legszebb példáján egy évvel később közeli barátom, az orosz Igor Novikov fedezte fel Moszkvában. Igor példája (30.3. ábra) azt mutatja, hogy a féregjárat-időgép természetes módon, mindenféle intelligens beavatkozás nélkül is létrejöhet.

A 30.3. ábrán a féregjárat alsó szája egy fekete lyuk körül kering, míg a felső attól távol van. A



30.2. ábra.

Egy könyv világcsőve Murph hálószobájának nyúlványában.

fekete lyuk nem gravitációja miatt Einstein görbült időre vonatkozó törvénye szerint az alsó szájnál sokkal lassabban telik az idő, mint a felsőnél. Legalábbis az intenzív gravitációs vonzás iránya, a külső univerzumban húzódó szaggatott bíborszínű pálya mentén. Tegyük fel, hogy ez az eltérés kereken egy óra, azaz az ábrán az alsó óra egy órával jár a felső mögött. A késés pedig folyamatosan nő.

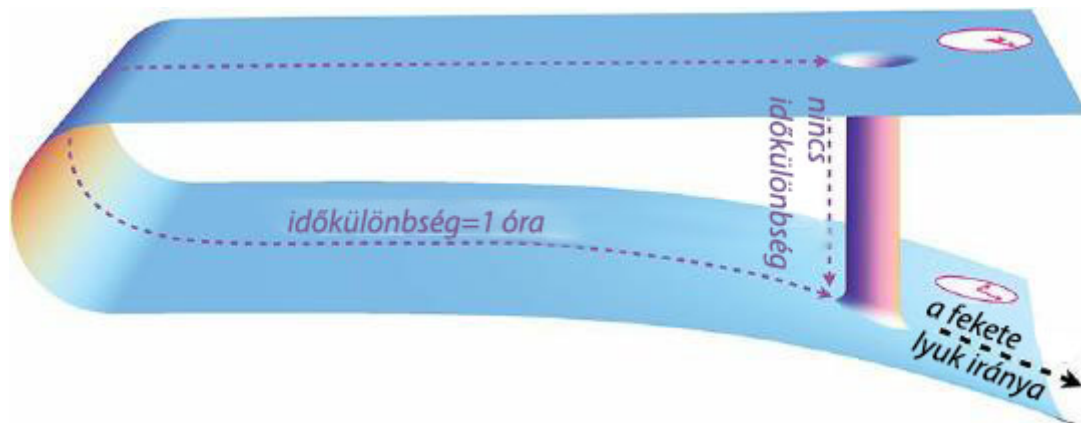
Mivel a féregjáratban csak nagyon kicsi gravitációs vonzás hat. Einstein időgörbültre vonatkozó törvénye szerint a féreglyukból nézve az idő lényegében ugyanúgy telik a felső és az alsó szájnál. Azaz nem mutatkozik késés, ha az órákat a féregjáraton keresztül hasonlítjuk össze: azok szinkronban járnak.

Tegyük fel továbbá, hogy a két száj közötti távolság a külső univerzumban elég kicsi ahhoz, hogy az órák szerint öt perc alatt megtehessük, a féregjáraton pedig egy perc alatt átjuthatunk. Így a féreglyuk máris egy időgép. Az ott elhelyezett óra szerint hagyjuk el 2:00-kor a felső száját, és utazzunk a külső univerzumban az alsóhoz, ahova a felső óra szerint 2:05-kor, az alsó szerint 1:05-kor érkezünk meg. Ezután a féregjáraton keresztül egy perc alatt felfelé utazzunk vissza az alsótól a felső szájhoz. Mivel az órák a féreglyukon keresztül szinkronizáltak, mindkét óra szerint 1:06-kor meg is érkezünk. Ötvennégy perccel a 2:00 órás indulásunk előtt érünk vissza a kiindulási pontba, ahol találkozunk fiatalabb önmagunkkal.

Néhány nappal korábban, amikor az időkülönbség sokkal kisebb volt, a féregjárat még nem működött időgépként. Abban a pillanatban vált azzá, amikor valami a lehető legnagyobb sebességgel, a fényével utazva a fenti utat bejárva előbb érkezett vissza a felső szájhoz, mint ahogyan onnan elindult volna.

Ha ez a valami például egy fényrészecske (foton), akkor a kiindulási helyen és időben egy helyett immár két fotonunk van. Miután ez a kettő is körbejár, négy lesz, nyolc, majd tizenhat és

így tovább! Folyamatosan növekvő mennyiségű, a féregjáraton átáramló energia, amely valószínűleg elég nagy ahhoz, hogy gravitációs hatása abban a pillanatban lerombolja a



30.3. ábra.

A féregjárat mint időgép

féreglyukat, amint az időgéppé válna.

Úgy tűnhet azonban, hogy ez könnyen megelőzhető. Csak védjük meg a féregjáratot a fotonoktól. Egyvalamitől azonban nem tudjuk megóvni: a fény nagyfrekvenciás kvantumos fluktuációitól, amelyek a kvantumtörvények szerint szükségszerűen léteznek (26. fejezet). 1990-ben kutatócsoportom egyik posztdoktori ösztöndíjasával, Sung-Won Kimmel kiszámoltuk, hogy mi történik az ilyen fluktuációkkal. Azt találtuk, hogy azok robbanássá erősödnek (30.4. ábra). Először úgy véltük, ez gyenge ahhoz, hogy megsemmisítse a féregjáratot, és az a robbanás ellenére is időgéppé válik. Stephen Hawking azonban másként gondolta. Felhívta a figyelmünket arra, hogy a robbanás folyamatát a kvantumgravitáció törvényei irányítják, így csak akkor tudhatjuk biztosan, hogy lehetséges-e az időben visszafelé utazás, ha ezeket a törvényeket már jól ismerjük.

Stephen annyira biztos volt a végső válasz nemleges voltában, hogy ezt a kronológia védelmében sejtésként⁸⁶ is megfogalmazta: A fizika törvényei mindig megakadályozzák az időben visszafelé történő utazást, „megőrizve így az univerzumot a történészek számára”.

Az elmúlt húsz évben sokan dolgoztak Hawking sejtésének bizonyításán vagy cáfolatán. Szerintem azonban ma is pontosan ott tartunk, ahol az 1990-es évek elején, amikor mi ketten vitáztunk a témáról: Csak a kvantumgravitáció törvényei adhatnak biztos választ.

⁸⁶ Angolul „chronology protection conjecture”. (a fordító megjegyzése)

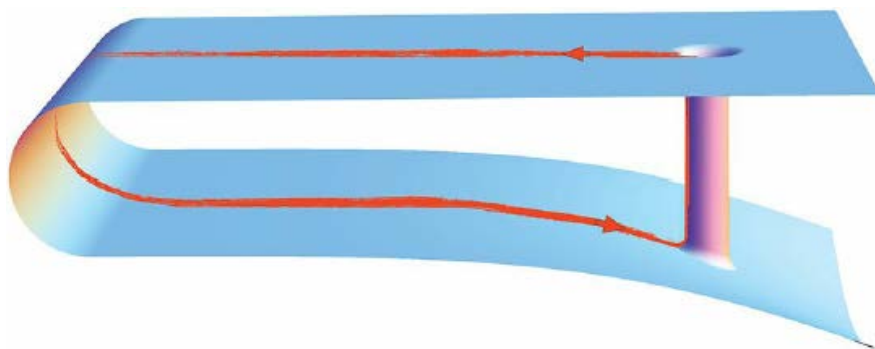
Időutazás befoglaló térrel



A fenti vizsgálatok és következtetések - megalapozott sejtések - azon fizikai törvényeken alapulnak, amelyek akkor érvényesek, *ha nem létezik egy nagy befoglaló tér a maga ötödik dimenziójával*. Mit mondhatunk az időutazásról, ha *létezik* egy ilyen nagy befoglaló tér, mint a *Csillagok között-ben*?

Mi, fizikusok olyan kényszerítő erejűnek tartjuk Einstein relativisztikus törvényeit, hogy úgy véljük, nemcsak a mi bránunkban, hanem a befoglaló térben is érvényesek. Ezért Lisa Randall, Raman Sundrum és mások egy egyszerű lépéssel, egy további térdimenzió hozzáadásával az ötdimenziós befoglaló térre is kiterjesztették ezeket a törvényeket. A kiterjesztés matematikai módszere annyira egyértelmű és szép, hogy joggal gondoljuk, jó úton járunk. A filmmel kapcsolatos értelmezésben ez a kiterjesztés képezi Brand professzor egyenletének és a gravitációs anomáliák megértéséért folytatott küzdelmének alapját (25. fejezet).

Ha ez a spekulatív kiterjesztés helyes, akkor az idő alapvetően ugyanúgy viselkedik a befoglaló térben, mint a bránunkban. Az objektumok és a jelek bránunkhoz hasonlóan a befoglaló térben annak lokális idejében mérve csak egy irányban, a jövő felé mozoghatnak. Visszafelé nem. Ha lehetséges a befoglaló térben időben visszafelé mozogni, az csak úgy érhető el, hogy kilépünk a befoglaló térből, és azt megelőzően lépünk vissza, hogy elindultunk volna, miközben a befoglaló tér helyi idejében mindvégig előrehaladunk. Ez a 30.3. ábra körutazásának befoglaló téri analógiája.



30.4. ábra.

A vörös útvonal mentén haladó fény kvantumfluktuációi robbanássá erősödnek abban a pillanatban, amikor a féregjárat időgéppé válik

Üzenet Murphnek: Amit fizikusként gondolok



Az idő ezen leírásán alapul a Cooper által Murphnek küldött üzenettel kapcsolatos magyarázatom.

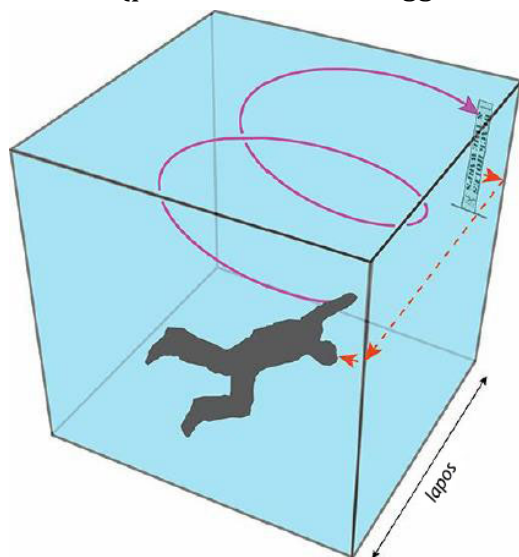
Emlékezzünk arra, hogy a hiperkocka olyan objektum, amelynek oldalai három-, a belseje pedig négydimenziós. Utóbbi a befoglaló tér része. A filmben látható minden hiperkocka-történet az oldalakban zajlik: Cooper, Murph, Murph hálósobája, a hálósoba nyúlványai, a könyvek és az óra világcsövei - mind-mind a hiperkocka oldalaiban léteznek. A hiperkocka belsejébe soha nem pillanthatunk. Azért nem, mert a tény csak három térdimenzióban terjedhet, négyben nem. Nem így a gravitáció.

Értelmezésem szerint Cooper Murph hálósobájában a könyveket azon fénysugarak segítségével láthatja, amelyek a hiperkocka oldalaiban haladnak (például a vörös szaggatott vonal a 30.5. ábrán). Amikor pedig megüti egy könyv vagy az óra másodpercmutatójának világcsövét, egy gravitációs jelet (gravitációs hullámot a befoglaló térben) generál, amely behatol a hiperkocka belsejébe és átszirálózik azon a 30.5. ábra lila görbéje mentén. A jel a befoglaló tér lokális idejében előrehalad, a szoba idejében azonban visszafelé, így előbb érkezik, mint ahogyan elindult⁸⁷. Ez a gravitációs szignál löki le a könyvet a polcra és rángatja az óra másodpercmutatóját.

A dolog hasonlít kedvenc Escher-rajzom, a Vízésés témájához (30.6. ábra). A lefelé haladás a rajzon analóg a hálósoba idejének előre irányával, a víz áramlása pedig a helyi idő előre folyásával. Egy vízen úszó levél ugyanúgy előre halad a vízzel, ahogyan a jelek a helyi időben a befoglaló térben.

A vízésésben lefelé eső levél olyan, mint a könyvtől

Cooper felé haladó fénysugár: Nemcsak a helyi időben halad előre, de lefelé is mozog (előre a

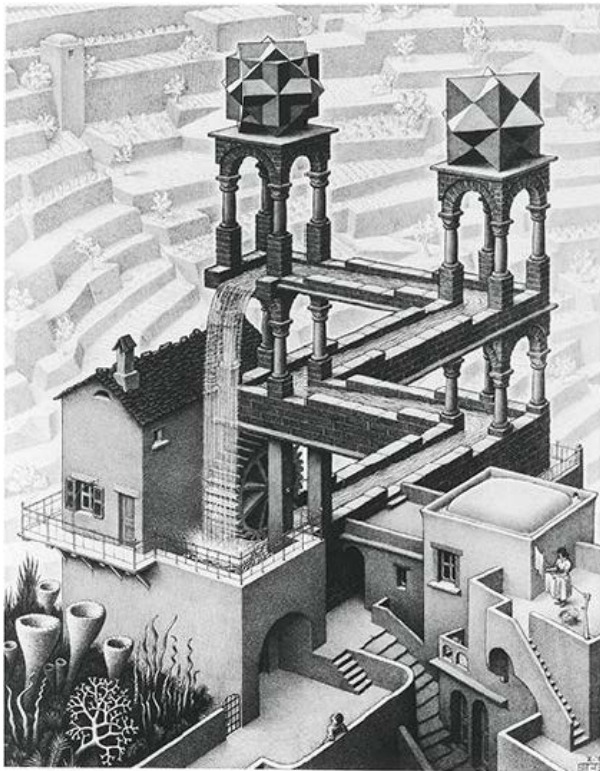


30.5. ábra

Cooper figurája a szaggatott vörös fénysugár segítségével látja a könyvet, amelyre a lila görbe mentén spirálózó gravitációs jellel gyakorol erőt. A brán egyik térdimenzióját elhagytam.

⁸⁷ Könnyen meg tudom adni annak a téridőgörbületnek matematikai leírását, amellyel ez elérhető - annak a görbületnek, amellyel a hiperterménkök megkísérelhetik a befoglaló tér lokális idejében előre, a hálósoba idejében azonban visszafelé haladó gravitációs jelek előállítását, lásd a kapcsolódó szakmai megjegyzést a könyv végén, különös tekintettel a Szm. 1. ábrára. Az, hogy a hipertérbeli mérnökök a gyakorlatban valóban létre tudják-e hozni ezt a görbületet, a kvantumgravitáció törvényeiről függ - azokról a törvényektől, amelyeket én nem ismerek, TARS viszont igen a Gargantua szingularitásából.

hálósoba idejében). A vízvezetékben haladva a levél a Coopertől a könyv felé tartó gravitációs jelet modellezi: helyi időben előremozog, de felfelé⁸⁸ (visszafelé a hálósoba idejében).



30.6. ábra.

Vízesés

Ebben az interpretációban hogyan magyarázható Amelia Brand leírása a hipertérleányek által érzékelhető időről? „Számukra talán az idő is csak egy fizikai dimenzió. Nekik lehet, hogy a múlt olyan, mint egy kanyon, amibe leereszkeszhetnek, a jövő pedig egy hegy, amit megmászhathatnak.”

Einstein kiterjesztett törvényei szerint a befoglaló tér lokális ideje nem lehet ilyen. A befoglaló térben semmi sem haladhat visszafelé annak lokális idejében. Amikor azonban a befoglaló térből a bránunkba néznek, Cooper és a hipertérleányek azt láthatják, és látják is, hogy bránunk ideje (a hálósoba ideje) úgy viselkedik, ahogyan Brand mondja. Szavait kissé átfogalmazva a befoglaló térből nézve „bránunk ideje csak egy másik fizikai dimenziónak tűnhet”. „Bránunk múltja olyan, mint egy kanyon, amibe Cooper leereszkeszhet (a hiperkocka átlós csatornájában

lefelé mozogva), a jövője pedig olyan, mint egy hegy, amit Cooper megmászhathat (a hiperkocka átlós csatornájában felfelé haladva, 29.14. ábra).”

Ez fizikusi interpretációm Brand szavait illetően, amelyeket Chris is hasonlóan értelmez.

Brand érintése az ötödik dimenzióon keresztül



A *Csillagok között*-ben Cooper küldetése véget ér azzal, hogy a kvantuminformáció eljutott Murphhöz. A hiperkocka, amely a befoglaló térben szállította, elkezd bezáródni.

⁸⁸ Egy optikai csalódásnak köszönhetően.

Ahogy záródik, Cooper a féregjáratot látja. Benne pedig az éppen a Gargantua felé tartó *Endurance*-t. Amint lepereg előtte az *Endurance* múltja, kinyújtja a karját, és az ötödik dimenzióan keresztül gravitációsan megérinti Brandet. Ő azt gondolja, hogy egy hipertér lény érintette meg. Valójában egy, a gyorsan záródó hiperkockában a befoglaló téren keresztül utazó lény volt az. Egy kimerült, öregebb Cooper.

31. Földi kolóniák világűrbe költöztetése



A *Csillagok között* elején, amikor Cooper először jár a NASA-bázison, egy óriási hengeres építményt mutatnak neki, amelynek az a feladata, hogy emberek ezreit a világűrbe juttassa, és ott sok generáción keresztül otthonukként szolgáljon: egy űrkolóniát. Arról is szó esett, hogy másutt több hasonló is épül.

„De hogyan lehet ezt felküldeni?” - kérdezi Cooper a professzort. „Az első anomáliák igen nagy áttörést hoztak - válaszolja a professzor. - Egyszerre kiderült, hogy a tömegvonzást használni lehetséges. Így hát elkezdtem dolgozni egy elméleten és elkezdtük építeni az állomást.”

A *Csillagok között* végén pedig egy űrkolónia mindennapi életébe is bepillantunk (31.1. ábra).

De hogyan kerültek végül a kolóniák az űrbe? A kulcsot természetesen az a kvantuminformáció jelenti (tudományos felfogásomban *a kvantumgravitáció törvényei*), amelyet TARS szerzett meg a Gargantua szingularitásából (26. és 28. fejezet), majd küldött el Coopernek és Murphnek (30. fejezet).

Értelmezésem szerint ezekben a törvényekben a kvantumfluktuációkat elhanyagolva (26. fejezet) Murph megfejtette a gravitációs anomáliákat irányító nemkvantumos törvényeket.



31.1. ábra.

Cooper az ablakon keresztül figyeli, ahogyan a gyerekek baseballt játszanak az űrkolónián.

Ezekből pedig azt is kitalálta, hogyan lehet felhasználni azokat.

Fizikusként engem természetesen a részletek érdekelnék. Brand professzor jó úton járt-e a tábláira felírt egyenletekkel? (25. fejezet és a könyv honlapja, az Interstellar.withgoogle.com) Valóban kezében volt-e a megoldás fele, ahogyan Murph állította még a kvantuminformáció megszerzése előtt? Vagy tévúton járt? Esetleg az anomáliák és a gravitáció ellenőrzésének módja teljesen más?

Talán a *Csillagok közön* folytatása fogja megválaszolni ezeket a kérdéseket. Christopher Nolan mestere a folytatásoknak, gondoljunk csak a Batman-trilógiára.

Egy dolog azonban teljesen egyértelmű. Murphnek azt kellett kitalálnia, hogyan lehet lecsökkenteni a Föld belsejében a Newton-féle G gravitációs állandót. Emlékezzünk vissza (25. fejezet), hogy a Föld gravitációs vonzása a newtoni inverz négyzetes törvénnyel írható le: $g = GM/r^2$, ahol r^2 a Föld középpontjától mért távolság négyzete, m a Föld tömege, G pedig a gravitációs állandó. Ha G értéke a felére csökken, ugyanez történik a földi gravitációval is. Ha ezerszer kisebb lesz, a Föld gravitációs vonzása is ezerszer lesz kisebb.

Olvasatomban, ha a Newton féle G gravitációs állandó értékét a Föld belsejében sikerült mondjuk csak egy órára az eredeti értékének ezredrészére csökkenteni, akkor a rakétahajtóművek hatalmas kolóniákat tudtak az űrbe emelni.

Mellékhatásként azonban ekkor a Föld magja - amelyre már nem nehezedik a felette lévő rétegek óriási súlya - hirtelen széttágul, mint egy rugó, megemelve a teljes földfelszínt. Gigantikus méretű földrengések pattannak ki és hatalmas szökőárak indulnak, óriási pusztítást eredményezve a bolygón, amint a kolóniák kirajzanak az űrbe. A Föld a növényvész által okozott katasztrófánál sokkal súlyosabb árat fizet. Amikor a G visszaáll megszokott értékére, a Föld is újra a régi méretére húzódik össze, ez azonban ismét pusztító földrengésekkel és szökőárakkal jár.

Az emberiség azonban megmenekült. Cooper és a kilencvennégy éves Murph pedig újra találkoztak. Aztán Cooper ismét elindult, hogy az univerzum távoli szegletében megtalálja Amelia Brandet.

Néhány búcsúgondolat



Minden alkalommal, amikor megnézem a filmet vagy végiglapozom ezt a könyvet, elcsodálkozom a bennük található tudomány szinte hihetetlen változatosságán, gazdagságán és szépségén.

Legnagyobb hatást a *Csillagok között* optimista alapüzenete gyakorolta rám: A fizika törvényei által irányított univerzumban élünk. Olyan törvények ezek, amelyeket mi, emberek felfedezhetünk, megérthetünk, uralhatunk, és felhasználhatjuk azokat saját sorsunk alakítására. Külső segítség nélkül is képesek vagyunk kezelni azokat a katasztrófahelyzeteket, amelyek elé az univerzum állít bennünket, sőt még azokat is, amelyeket mi magunk okozunk - a klímaváltozástól kezdve a biológiai vészhelyzeteken keresztül a nukleáris katasztrófákig.

Sorsunkat azonban csak úgy irányíthatjuk, ha minél többen megbecsüljük és megértjük a tudományt: Azt, hogy miként működik, mit mond az univerzumból, a Földről, az életről, mit érhetünk el vele. Melyek korlátozott tudásunkból és technológiánkból eredő határai, és hogyan léphetők át ezek a határok. Hogyan jutunk el a spekulációtól a megalapozott sejtésen keresztül az igazságig. Miért olyan ritkák azok a nagyon fontos forradalmi változások, amelyek során korábbi igazságaink újnak adják át helyüket.

Remélem, ez a könyv hozzájárul mindennek megértéséhez.

TOVÁBBI AJÁNLOTT OLVASMÁNYOK

1. fejezet. Egy tudós Hollywoodban: A Csillagok közöli születése

A hollywoodi viszonyok és a filmkészítés hullámvasútja iránt érdeklődő olvasóknak melegen ajánlom alkotótársam, Linda Obst két könyvét: *Hello, He Lied: & Other Truths From the Hollywood Trenches* (Obst 1996) és *Sleepless itt Hollywood: Tales from the New Abnormal in the Movie Business* (Obst 2013).

2. fejezet. Univerzumunk dióhéjban

Az éjszakai égbolt szabad szemmel, binokulárral és távcsővel megfigyelhető látnivalói mellett az egész univerzumból nyújt áttekintést rengeteg képpel a következő munka: *Universe: The Definitive Visual Guide* (Rees 2005). Sok kiváló mű született a világegyetem legelső pillanatairól, az ősrobbanásról, arról, hogy az egész hogyan kezdődött. Különösen kedvelem a következőket: *The Inflationary Universe* (Guth 1997); *Big Bang: The Origin of the Universe* (Singh 2004, magyarul: *A nagy bumm* - Park Kiadó, 2007); *Many worlds in One: The Search for Other Universe* (Vilenkin 2006); *The Book of Universes: Exploring the Limits of The Cosmos* (Barrow 2011, magyarul: *Univerzumok könyve - A kozmosz határainak leírása* - Akkord Kiadó Kft., 2012); valamint a *From Eternity to Here: The Quest for the ultimate Theory of Time* (Carroll 2011) 3., 14. és 16. fejezete. Az ősrobbanással kapcsolatos legújabb eredményekről Sean Carroll *Preposterous Universe* (Carroll 2014) blogjáról tájékozódhatunk a <http://www.preposterousuniverse.com/blog/> címen.

3. fejezet. Az univerzumot irányító törvények

A huszadik század egyik legnagyobb fizikusa, Richard Feynman 1964-ben a nagyközönség számára tartott előadás-sorozatban hatolt az univerzumot irányító természeti törvények mélyére. Kedvenceim közé tartozik az előadások szerkesztett változatát közlő, *The Character of Physical Law* (Feynman 1965) című könyv (magyarul: *Fizikai törvények jellege* - Akkord Kiadó Kft., 2005). Sokkal részletesebben, naprakészebben és hosszabban olvashatunk ugyanerről a témáról az újabb adalékokat is tartalmazó *The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality* (Greene 2004) című munkában (magyarul: *A kozmosz szövedéke - A tér, az idő és a valóság szerkezete* - Akkord Kiadó Kft., 2011). Könnyedebb, talán humorosabb, de ugyanolyan alapos a *The Grand Design* (Hawking-Mlodinow 2010) című könyv (magyarul: *A nagy terv* - Akkord Kiadó Kft., 2011).

4. fejezet. Görbült idő, görbült tér és az árapályerők

Einstein görbült időre és görbült térre vonatkozó koncepciójának történeti részleteiről, az árapályerőkkel való kapcsolatokról és az erre a koncepcióra alapuló relativisztikus törvényeiről a *Black holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* (Thorne 1994) 1. és 2. fejezetében olvashatunk, az Einsteint igazoló kísérletek garmadáját pedig a *Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test* (Will 1993) mutatja be. Einstein „Subtle Is the Lord...”: *The Science and the Life of Albert Einstein* (Pais 1982) című életrajza minden szempontból részletesen foglalkozik Einstein tudományos tevékenységével, de Thorne és Will munkájánál jóval nehezebben emészthető. Léteznek sokkal teljesebb Einstein-életrajzok is - személyes kedvencem az *Einstein: His Life and Universe* (Isaacson 2007) de egyik sem foglalkozik olyan részletesen és alaposan Einstein tudományos eredményeivel, mint Pais munkája.

A Gravity front the Ground Up: A Introductory Guide to Gravity and General Relativity (Schutz 2003) az átlagolvasó számára szóló alapos tárgyalása a gravitációnak (mind a newtoni, mind az einsteini görbült téridő koncepciója) és az univerzumban betöltött szerepének. Felsőfokú fizikai vagy műszaki végzettségűeknek ugyanerről a témáról James Hartle *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity* (Hartle 2003) és Bernard Schutz *A First Course in General Relativity* (Schutz 2009) című könyveit ajánlom.

5. fejezet. Fekete lyukak

A fekete lyukakkal kapcsolatos részleteket illetően és azzal kapcsolatban, hogy honnan tudjuk azt, amit tudni vélünk róluk, a következőket ajánlom: *Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe* (Begelman-Rees 2009), *Black Holes & Time Warps* (Thorne 1994) és Stephen Hawking 70. születésnapjára készített köszöntőjén tartott előadásom (<http://www.ctc.cam.ac.uk/hawking70/multimedia.html>). Andrea Ghez egy TED-előadás⁸⁹ keretében mutatta be csoportjának csodálatos felfedezését a Tejútrendszer centrumában elhelyezkedő fekete lyukról (https://www.ted.com/speakers/andrea_ghez), és a csoport honlapja (<http://www.galacticcenter.astro.ucla.edu/>) is sok érdekes információval szolgál.

6. fejezet. A Gargantua anatómiája

Az ebben a fejezetben szereplő fekete lyukak tulajdonságaival kapcsolatban lásd a *Black Holes & Time Warps* (Thorne 1994) 7. fejezetét, különös tekintettel a 272-295. oldalakra, ugyanezt egyenletekkel alátámasztva pedig a *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity* (Hartle

⁸⁹ Technology, Entertainment, Design-Technológia, szórakozás, dizájn (A szakmai lektor megjegyzése)

2003) című munkát, illetve jelen könyv *Néhány szakmai megjegyzés* című függelékét. A tűzburokról és az abban átmenetileg csapdába esett fotonokról Edward Teo szakcikkében (Teo 2003) olvashatunk.

7. fejezet. Gravitációs parittyák

A gravitációs hintamanőverekről a https://en.wikipedia.org/wiki/Gravity_assist Wikipédia-szócikkból szerezhethetünk az én tárgyalásomnál némileg részletesebb szakmai ismereteket. Azt azonban ne higgyük el, amit a fekete lyukak körüli lendítésekéről közöl. Állítása (a 2014. július 4-i állapotnak megfelelően), miszerint „ha az űreszköz egy fekete lyuk Schwarzschild-sugarának [horizont] közelébe kerül, ott a tér már annyira görbült, hogy a lendítési pályán több energia kell az elszakadáshoz, mint amennyi a fekete lyuk mozgásából nyerhető”, egyszerűen nem igaz. A Wikipédiát egyébként is fenntartásokkal kell kezelni. Tapasztalatom szerint az én szakterületemen állításainak körülbelül 10 százaléka hamis vagy félrevezető.

A Wikipédiánál megbízhatóbb, bár kevésbé részletes forrás a gravitációs hintamanőverekről a <https://solarsystem.nasa.gov/basics/primer/> oldal. A Csillagok között promóciójához fejlesztett hintamanőver-játék a <http://game.interstellarmovie.com/> honlapon játszható.

A gravitációs hintamanőverekhez általam segítségül hívott közepes tömegű fekete lyukakkal kapcsolatban a *Black Hole Astrophysics: The Engine Paradigm* (Meier 2012) 4. fejezetében olvashatunk szakmai információkat.

A gyorsan forgó fekete lyukak körüli, a 7.6. ábrához hasonló összetett pályákat generálhatunk és tanulmányozhatunk a Dávid Sarolf által írt program segítségével, amely a <http://demonstrations.wolfram.com/3DKerrBlackHoleOrbits/> címen érhető el.

8. fejezet. A Gargantua megjelenítése

A világhálón sok, fizikusok által fejlesztett szimuláció található, amelyek csillagmezők fekete lyukak gravitációs-lencse-hatása általi leképezését mutatják be, hasonlóan a Csillagok között-ben látottakhoz. Ezek közül különösen érdekesek Alain Riazuelo munkái, lásd <http://www2.iap.fr/users/riazuelo/interstellar/index.php>, továbbá a 28. fejezetre vonatkozó részt lentebb.

Paul Franklin csoportjával néhány szakcikket tervezünk közölni azokról a szimulációkról, amelyeket ők írtak az általam szolgáltatott egyenleteket felhasználva. Ezen szimulációk alapján készültek a Gargantua, az akkréciós korong és a féregjárat Csillagok között-ben látható megjelenítései, de további, meglepő dolgokat feltáró futtatások is. A cikkek a

<https://arxiv.org/find/gr-qc> címen lesznek elérhetőek. (Ezek közül kettő már meg is jelent. [A fordító megjegyzése.])

9. fejezet. Korongok és kilövellések

A kvazárok, akkréciós korongok és kilövellések alapos bemutatása a *Gravity's Fatal Attraction* (Begelman-Rees 2009) című könyvben és a *Black Holes & Time Warps* (Thorne 1994) 9. fejezetében, a még részletesebb és szakszerűbb tárgyalás pedig a *Black Hole Astrophysics* (Meier 2012) című munkában olvasható. A csillagok fekete lyukak árapályereje általi szétszaggatásáról és az ennek eredményeként keletkező akkréciós korongokról James Guillochon honlapján (<https://astrocrash.net/science/tidal-disruption-of-stars/>) tájékozódhatunk, aki munkatársaival azokat a szimulációkat készítette, amelyeken a 9.5. és 9.6. ábrák alapulnak. Akkréciós korongok és kilövellések asztrofizikai szempontból is realisztikus, Jonathan C. McKinney, Alexander Tchekhovskoy és Roger D. Blandford (McKinney-Tchekhovskoy-Blandford 2012) szimulációin alapuló animációi Ralf Kaehler (Stanford University) honlapján találhatóak a <https://www.slac.stanford.edu/~kaehler/homepage/visualizations/black-holes.html> címen. Akkréciós korongok Doppler-eltolódást és a gravitációs-lencse-hatást is figyelembe vevő képeit láthatjuk Avery Broderick <http://www.science.uwaterloo.ca/~abroderi/Press/> oldalán is. A Gargantua akkréciós korongjának megjelenítését megalapozó szimulációkat bemutató egy vagy több cikk a <https://arxiv.org/find/gr-qc> oldalon lesz elérhető. (Ezek közül kettő már meg is jelent. [A fordító megjegyzése.])

10. fejezet. A véletlen az evolúció fő építőköve

A szakcikkeken és szakkönyveken kívül nincs tudomásom olyan szimulációk leírásáról, amelyek a csillagsűrűség növekedését mutatják egy nagy tömegű fekete lyuk környezetében. A szakmai tárgyalást és elemzést látó a *Dynamics and Evolution of Galactic Nuclei* című könyv (Merritt 2013) 7. fejezetében, különös tekintettel a 7.4. ábrára.

11. fejezet. Növényvész

Ha figyelemmel kísérjük a napi tudományos híreket, vagy egyszerűen csak körülnézünk a világban, számos példát láthatunk azokra a forgatókönyvekre, amelyeket biológus kollégáim ebben a fejezetben felvázoltak - szerencsére ezek egyelőre még nem katasztrofális példák. Egyik legutóbbi ilyen egy halálos vírus meglepő áttérjedése növényekről méhekre (<https://blogs.scientificamerican.com/artful-amoeba/suspicious-virus-makes-rare-cross-kingdom-leap->

[from-plants-to-honeybees/](#)). Ez sokkal nagyobb ugrás volt, mint a *Csillagok között*-ben a fertőzés áttérjedése az okráról a kukoricára, de annál kevésbé veszélyes patogénről van szó. Másik példa az amerikai tájat valaha uraló fafajok gyors eltűnése: nemcsak a 11. fejezetben Meyerowitz által említett szelídgesztenye, de az amerikai szilfa (<https://www.thespruce.com/dutch-elm-disease-on-american-elm-trees-2131195>) és a Palomar-hegyen, a 200 hüvelykes távcső közelében található faházam körüli óriásfenyők is ilyenek.

12. fejezet. Légszomj

Az oxigén körforgása a belélegezhető O_2 és a CO_2 molekula (és lassabban egyéb formák) között a Föld „oxigén-ciklusa”. Keressünk rá a Google-ben! A szén körforgása a légköri CO_2 a növények (élő és elpusztult) és (sokkal lassabban) egyéb formák, például a szén, olaj és a kerogén között a „szénciklus”. Szintén keressünk rá a Google-ban!

13. fejezet. Csillagközi utazás

Az exobolygókat (Naprendszeren kívüli bolygókat) napjainkban örült tempóban fedezik fel. Naponta frissített, közel teljes katalógusok a <http://exoplanet.eu/> és <http://exoplanet.org> oldalakon böngészhetők, míg a potenciálisan lakható exobolygók listája a <http://phl.upr.edu/hec> oldalon található. Az exobolygók és a Naprendszeren kívüli élet kutatásának története a *Mirror Earth: The Search for Our Planet's Twin* (Lemonick 2012) és a *Five Billion Years of Solitude: The Search for Life Among the Stars* (Billings 2013) című munkákban olvasható, szakmai és tudományos részletekkel pedig a *The Exoplanet Handbook* (Perryman 2011) szolgál. *Confessions of an Alien Hunter: A Scientist's Search for Extraterrestrial Intelligence* (Shostak 2009) kitűnő leírása a földönkívüli intelligencia rádiójelek alapján és egyéb módszerekkel történő keresésének (SETI).

A csillagközi utazáshoz igénybe vehető lehetőségeinkkel kapcsolatban a https://en.wikipedia.org/wiki/Interstellar_travel Wikipédia-oldalt (magyarul: https://hu.wikipedia.org/wiki/Csillagk%C3%B6zi_rep%C3%BCl%C3%A9s) és a <http://fourthmillenniumfoundation.org/> oldalt ajánlom. Mea Jemmi son úrhajós az élharcosa annak a törekvésnek, amely azt célozza, hogy a következő évszázadban embereket küldjünk a Naprendszeren túlra, lásd <http://100yess.org/> Rengeteg sületlenséget írtak a tér- görbítés és a féregjáratok segítségével történő csillagközi utazásról. A jelen és valószínűleg még a következő néhány évszázad technológiája sem lesz alkalmas arra, hogy bármilyen realisztikus erőfeszítést tehesünk ebben az irányban, hacsak valamilyen sokkal fejlettebb civilizáció nem hozza létre a szükséges téridőgörbületet, mint a *Csillagok között*-ben. Ne vesztegessük tehát az időnket olyan cikkek és jóslatok tanulmányozásával, amelyek azzal áztatnak bennünket, hogy a csillagközi

utazáshoz szükséges térgörbületet még a mi életünkben vagy akár csak dédunokáink idejében elő tudjuk állítani.

14. fejezet. Féregjáratok

Bár már közel húszéves, a féregjáratokkal kapcsolatos részleteket illetően a *Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking* (Visser 1995) című könyvet ajánlom, csakúgy, mint a *Black Holes & Time Warps* (Thorne 1994) utolsó, a *Time Travel and Warp Drives* (Everett-Roman 2012) 9. és a *Black Holes, Wormholes, and Time Machines* (Al-Khalili 2012) 8. fejezetét. A féregjárat nyitva tartásához szükséges egzotikus anyaggal kapcsolatos naprakész tárgyalást a *Time Travel and Warp Drives* (Everett-Roman 2012) 11. fejezete tartalmazza.

15. fejezet. A Csillagok között féregjáratának megjelenítése

A féregjárat megjelenítésének részleteiről Paul Franklin csapatával egy vagy több szakcikket tervezünk, amelyek a <https://arxiv.org/find/gr-qc> címen lesznek elérhetők. (Ezek közül kettő már meg is jelent. [A fordító megjegyzése.])

16. fejezet. A féregjáratok felfedezése: gravitációs hullámok

A LIGO-val és a gravitációs hullámok keresésével kapcsolatos legfrissebb információkért látogassuk meg a LIGO Scientific Collaboration honlapját a <https://www.ligo.org/> címen, főleg a „News” és a „Magazine” menüpontokat, a LIGO Laboratory oldalát (<https://www.ligo.caltech.edu/>), illetve nézzük meg Kai Staat 2014-es filmjét a <http://www.space.com/25489-ligo-a-passion-for-understanding-complete-film.html> címen. A világhálón a gravitációs hullámokról és a görbült téridőről szóló több előadásom is megtalálható, például a három „Pauli-előadás” a <https://www.video.ethz.ch/> címen, amelyeket azonban nem a listának megfelelő sorrendben, hanem éppen fordítva kell megnézni, a <https://www.youtube.com/watch?v=Lzrlr3b5a08> címen pedig egy inkább szakmai előadásom érhető el. A fekete lyukak ütközését és az általuk kibocsátott gravitációs hullámokat bemutató, az SXS csoport szimulációm alapuló animációk találhatók a <http://www.blackholes.org/?f> címen.

Az átlagolvasó számára is érthető, naprakész könyv nincs a gravitációs hullámokról, ezért az *Einstein's Unfinished Symphony: Listening to the Sounds of Space-Time* (Bartusiak 2000) című munkát ajánlom, amely még nem avult el egészen. A gravitációs hullámok kutatásának Einsteintől kezdődő történetét a *Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves* (Kennefick 2007) című könyvből ismerhetjük meg.

17. fejezet. Miller bolygója

Ebben a fejezetben sok megállapítást teszek Miller bolygójával kapcsolatban: pályájáról, forgásáról (a billegéstől eltekintve mindig ugyanazt az oldalát fordítja a Gargantua felé), a Gargantua árapály-erejéről, amely deformálja és billegteti, a Gargantua által magával ragadott téridőről és arról, hogy az miként befolyásolja a tehetetlenséget, a centrifugális erőket és a fénysebességet, mint felső határt. A megállapítások a fizika einsteini relativisztikus törvényein, az általános relativitáselméleten alapulnak. Ezen könyv 17. fejezetén kívül nem ismerek nem szakembereknek szóló könyvet, cikket vagy előadást, amely egy forgó fekete lyukhoz közel keringő bolygó által érzékelt hatásokat tárgyalná. Felsőfokú tanulmányokat végzők megpróbálkozhatnak az állítások ellenőrzésével a Hartle-féle *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity* (Hartle 2003) című könyv gondolatmenetei és egyenletei alapján.

A „Miller bolygójának története” részben felvetett kérdésem nem igényli a relasztivisztikus fizika ismeretét. Majdnem teljes egészében megválaszolható a Newton-törvények alapján, a szükséges információk pedig megtalálhatók a geofizikával, illetve a bolygók és holdjaik fizikájával foglalkozó könyvekben és honlapokon.

18. fejezet. A Gargantua rezgései

Bili Press azon felfedezésének bemutatása, hogy a fekete lyukak rezeghetnek, illetve a rezgéseket leíró egyenletek Saul Teukolsky-féle származtatása a *Black Holes & Time*

Warps (Thorne 1994) 295-299. oldalán olvasható. A Fekete lyukak rezgéseit és azok lecsengését, amin a 18.1. ábra és Romilly adatai is alapulnak. Huan Yang, Aaron Zimmerman és kollégáik szakkikke tárgyalja (Yang és munkatársai 2013).

21. fejezet. A negyedik és ötödik dimenzió

A tér és az idő egyesítéséről további részleteket olvashatunk a *Black Holes & Time Warps* (Thorne 1994) 73-79. oldalán. John Schwarz és Michael Green szuperhúrelmélet-áttöréséről és arról, hogy ez hogyan vezetett az extra dimenziót tartalmazó befoglaló tér létezésének felvetéséhez, a *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory* (Greene 2003) című könyvből (magyarul: *Az elegáns univerzum - Szuperhúrok, rejtett dimenziók és a végső elmélet kihívása* — Akkord Kiadó Kft., 2003) tájékozódhatunk.

22. fejezet. Hipertérbeli lények

Edwin A. Abbott *Flatland* (Abbott 1884) című könyvéből készült, rendkívül kedvezően fogadott animációs film a *Flatland: The Film* (Ehlinger 2007). A Flatland matematikai hátterének és a történet 19. századi angol társadalommal való kapcsolatának részletes tárgyalása a *The Annotated Flatland: A Romance of Many Dimensions* (Stewart 2002) című munkában található. A négy térdimenzió megjelenítésével kapcsolatos kérdéseket a *The Visual Guide to Extra Dimensions, Volume I: Visualizing the Fourth Dimension, Higher-Dimensional Polytopes, and Curved Hypersurfaces* (McMullen 2008) című könyv tárgyalja.

23. fejezet. Csapdába ejtett gravitáció

A fejezetben tárgyaltnál sokkal bővebb áttekintéshez a *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions* (Randall 2006) című munkát ajánlom. Alapos összefoglalása a modern fizika elveinek és előrejelzéseinek a befoglaló térről és annak extra dimenzióiról Lisa Randalltól, aki Rámán Sundrummal közösen felismerte, hogy az AdS-görbület bránunk közelébe zárhatja a gravitációt (23.4. és 23.6. ábra). Az AdS-réteg és az AdS-szendvics gondolata - amelyet én is újra felfedeztem - először Ruth Gregory, Vaierij A. Rubakov és Szergej M. Szibirjakov szakcikkében jelent meg (Gregory, Rubakov, Sibiryakov 2000). Annak kimutatása, hogy az AdS-szendvics instabil, Edward Witten érdeme (Witten 2000).

24. fejezet. Gravitációs anomáliák

A Merkúr pályájának rendellenes perihélium-mozgásával és a Vulcan bolygó keresésével kapcsolatban a tudománytörténész N. T. Roseveare *Mercury's Perihelion from Le Verriere to Einstein* (Roseveare 1982) című értekezését, illetve Richard Baum és William Sheehan csillagászok sokkal olvasmányosabb, ám kevésbé átfogó *In Search of the Planet Vulcan: The Ghost in Newton's Clockwork Universe* (Baum, Sheehan 1997) című munkáját ajánlom.

A sötét anyag létezésére utaló jelek felismerésével és a kutatás jelenlegi állásával kapcsolatban a terület egyik vezető kutatója, Katherine Freeze *The Cosmic Cocktail: Three Parts Dark Matter* (Freeze 2014) című könyvének tanulmányozását javaslom.

A világegyetem tágulásának rendellenes gyorsulásával és az ezt feltételezhetően okozó sötét energiával kapcsolatban a *The Cosmic Cocktail* (Freeze 2014) és a *The 4% Universe: Dark Matter, Dark Energy, and the Race to Discover the Rest of Reality* (Panek 2011) című munkákat ajánlom.

25. fejezet. A professzor egyenlete

Az elképzelés, hogy a newtoni G gravitációs állandó térben és időben is változhat, és hogy ez valamiféle nemgravitációs mezővel még szabályozható is, igen aktuális téma volt a Princeton Universityn, amikor Phd-hallgató voltam ott az 1960-as években. Az ötletet Robert H. Dicke professzor és diákja, Carl Brans vetette fel az Einstein-féle általános relativitáselmélet érdekes alternatívájaként megalkotott gravitációelméletükkel (Brans-Dicke-elmélet) összefüggésben (*Was Einstein Right?* [Will 1993] 8. fejezete). Brans ezzel kapcsolatos személyes visszaemlékezése az *Einstein Online*-on megjelent „*Varying Newton's Constant: A Personal History of Scalar-Tensor Theories*” című cikkében olvasható (Brans 2010). A Brans-Dicke-elméletet a G változásának kimutatását célzó kísérletek motiválták, amelyek során azonban soha semmilyen meggyőző változást nem sikerült detektálni, lásd például a *Was Einstein Right?* (Will 1993) 9. fejezetét. Ugyanezek az elképzelések és kísérletek motiválták a *Csillagok között* gravitációs anomáliára és azok kontrollálhatóságára vonatkozó értelmezésemet is: a G értékét és annak változását hiper-térmezők határozzák meg.

A professzor táblára írt egyenlete (25.6. ábra) is ezekre a gondolatokra épül. Elegyíti azokat a befoglaló tér ötödik dimenziójára kiterjesztett einsteini relativisztikus törvényekkel (általános relativitás), amelyek alapjait Roy Maartens és Koyama Kazuya fektette le egy szakcikkkben (Maartens-Kazuya 2010), és az ún. variációszámítás matematikájával (lásd például https://en.wikipedia.org/wiki/Calculus_of_variations). A professzor egyenletével kapcsolatos további részletek a *Néhány szakmai megjegyzés* című függelékben találhatók.

26. fejezet. Szingularitások és a kvantumgravitáció

A kvantumfizikával és a kvantumfluktuációkkal való megismerkedéshez a *The Ghost in the Atom: A Discussion of the Mysteries of Quantum Physics* (Davies and Brown 1986) című könyvet javaslom. Nem ismerek olyan cikket vagy könyvet, amely nem fizikus szakembereknek magyarázná el az emberi méretű tárgyak, például a LIGO tükreinek kvantumviselkedését. Szakmai szempontból a harmadik Pauli-előadásomban (<https://www.video.ethz.ch/speakers/pauli/2011/67583b3c-6ae3-4033-9944-cd2e0a2b777.html>, a listában az első) foglalkoztam vele. Az önéletrajzában John Wheeler elmondja, hogyan jutott el a kvantumhab gondolatáig (*Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics* [Wheeler and Ford 1998] 11. fejezete).

A *Black Holes & Time Warps* (Thorne 1994) 11. fejezetében bemutatom azt, hogy 1994-ben mit tudtunk a fekete lyukak belsejéről -és hogy miként jutottunk e tudás birtokába, beleértve a BKL-szingularitást és annak dinamikáját, illetve a behulló szingularitást (tömegfelfuvódási szingularitás), amelyet nem sokkal korábban fedezett fel Erik Poisson és Werner Israel (Poisson-Israel 1990), és abban az időben még csak nagyon kevés ismeretünk volt róla. A kirepülő

szingularitás felfedezése annyira új dolog, hogy egyáltalán nem létezik semmiféle tárgyalása nem szakemberek számára. A felfedezést közlő szakcikk szerzői Donald Marolf és Amos Ori (Marolf-Ori 2013). Matthew Choptuik eredménye, miszerint átmenetileg létrejöhetnek kicsi csupasz szingularitások, a felfedező szakcikkében (Choptuik 1993) látott napvilágot.

27. fejezet. A vulkán pereme

A vulkánszerű felület, amelyről a fejezet nagy része szól (27.3., 27.5. és 27.9. ábra) az elemi fizika egyenleteivel is leírható, ahogyan az *Endurance* pályája, a pálya instabilitása a peremen és az *Endurance* Miller bolygójára történő elindulása is. Lásd a *Néhány szakmai megjegyzés* című részt.

28. fejezet. Zuhanás a Gargantuába

A *Black Holes & Time Warps* (Thorne 1994) bevezetőjében az itt leírtaknál sokkal részletesebben mutatom be, hogy mit láthatnánk és érezhetnénk egy fekete lyuk eseményhorizontján áthaladva, vagy egy ilyen eseményt a horizonton kívülről szemlélve, illetve azt, hogy mindezt hogyan befolyásolja a fekete lyuk tömege és forgása.

Andrew Hamilton készített egy „feketelyuk-repülés”-szimulátort annak demonstrálására, hogy miként nézne ki a bezuhanás egy nem forgó fekete lyukba. A sok évvel korábban végzett számításainak eredményei hasonlítanak ahhoz, amit Paul Franklin csapata hozott létre a *Csillagok között*-ben (8., 9. és 15. fejezet). Andrew a szimulátorával figyelemre méltó animációk sorozatát állította elő, amelyek letölthetők a <http://jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh/> honlapról, de a világ sok planetáriumában is megtekinthetők (http://www.spitzinc.com/fulldome_shows/show_blackholes).

Andrew animációi azonban több szempontból is különböznek a *Csillagok között*-ben látható képkockáktól: Először is pedagógiai célzattól Andrew néha rávetít egy hálózatot a fekete lyuk eseményhorizontjára (ilyen hálózat természetesen sem a valódi fekete lyukaknál, sem a Csillagok között Gargantuájánál nincs), és ilyenkor a fekete lyukat létrehozó felrobbant csillagot az ún. „múltbeli horizonttal”⁹⁰ helyettesíti. Másodszor, a „Journey into a Realistic Black Hole,” <http://jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh/realistic.html> című klipjében Andrew kilövellésekkel és akkréciós koronggal is ellátta a fekete lyukat. A korongból gáz hullik az eseményhorizonton

⁹⁰ Pontosabban és szakszerűbben fogalmazva a kamerája nem a fekete lyukba zuhan, hanem az Einstein-egyenletek Reissner-Nordström-, más néven maximálisan kiterjesztett (a szingularitás teljes téridejét lefedő [a fordító megjegyzése] Schwarzschild-megoldásába).

keresztül a fekete lyukba, és ez a behulló gáz dominálja azt, hogy mit lát a kamera a horizonton áthaladva és mögötte. A *Csillagok között*-ben ezzel ellentétben nincs kilövellés, a tömegbefogási korong pedig olyan ritka, hogy egyáltalán nem hullik belőle gáz az eseményhorizont mögé, így a fekete lyuk belseje inkább sötét. Cooper lát azonban némi tompa fényt, és találkozik az előtte behulló anyagból származó fehér szikrákkal. Ezek nem szimuláció eredményei, a Double Negative grafikusai adták a látványt a képkockákhoz.

29. fejezet. A hiperkocka

Amikor Christopher Nolan elmondta, hogy hiperkockát akar használni a *Csillagok között*-ben, teljesen fellelkesültem. A hiperkocká- ról először tizenhárom éves koromban olvastam George Gamow csodálatos *One, Two, Three... Infinity* (Gamow 1947) című könyvében, és ez az élmény nagy szerepet játszott abban, hogy elméleti fizikus akartam lenni. A hiperkocka részletes tárgyalását a *The Visual Guide to Extra Dimensions* (McMullen 2008) című munkában találhatjuk, Christopher Nolan összetett hiperkockája azonban egyedi, ezen a könyvön és a filmhez kapcsolódó egyéb anyagokon kívül sehol másutt nem olvashatunk róla.

Madeleine L'Engle gyerekeknek szóló klasszikus, *A Wrinkle in Time* (L'Engle 1962) című tudományos fantasyjében a gyerekek egy hiperkockával indulnak - „tesszerelnek” - édesapjuk keresésére. Értelmezésem szerint ez is egy befoglaló téren keresztüli utazás egy hiperkocka oldalában, hasonlóan ahhoz, ahogyan Cooper jutott el a Gargantua belsejéből Murph hálósobájába, lásd a 29.4. ábrát.

30. fejezet. Üzenet a múltba

Azzal kapcsolatban, amit a fizikusok jelenleg tudnak a négydimenziós téridőnkben időben visszafelé történő utazásról befoglaló tér nélkül, lásd a *Black Holes & Time Warps* (Thorne 1994) utolsó fejezetét, Hawking, Novikov és Thorne *The Future of Spacetime* (Hawking és munkatársai 2002) című munkájának és a *Time Travel and Warp Drives* (Everett-Roman 2012) című könyvnek megfelelő fejezeteit. Mindegyiket olyan fizikusok írták, akik jelentősen hozzájárultak az időutazás elméletének fejlesztéséhez. Az időutazással kapcsolatos modern kutatások történeti aspektusaival foglalkozik a *The New Time Travelers: A Journey to the Frontiers of Physics* (Toomey 2007) című munka. Fizikai, metafizikai és tudományos-fantasztikus szempontból átfogóan tárgyalja az időutazást a *Time Machines: Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction* című könyv (Nahin 1999), a *From Eternity to Here: The Quest for The Ultimate Theory of Time* (Carroll 2011) pedig csodálatos összefoglalása mindannak, amit a fizikusok tudnak vagy tudni vélnek az idő természetéről.

Nem ismerek az átlagolvasó számára szóló könyvet vagy cikket, amely az időutazást olyan feltételek mellett tárgyalná, amikor univerzumunk egy magasabb dimenziós befoglaló tér bránja, de ahogyan azt a 30. fejezetben bemutattam, az Einstein-törvények kiterjesztése magasabb dimenziókra gyakorlatilag ugyanazt az eredményt adja, mint befoglaló tér nélkül.

Annak részleteit illetően, hogy Cooper hogyan küldött üzenetet Murph számára az időben visszafelé, lásd a *Néhány szakmai megjegyzés* című függelék

31.fejezet. Földi kolóniák világűrbe költöztetése

Értelmezésem szerint a *Csillagok között*-ben Murph a G redukálásával oldotta meg a kolóniák világűrbe költöztetését a Földről, ezzel kapcsolatban lásd a 25. fejezethez fűzött magyarázatot fentebb.

Amikor az 1960-as évek elején PhD-hallgató voltam Princeton-ban, egyik fizikaprofesszorom, Gerard K. O'Neill egy ambiciózus megvalósíthatósági tanulmány elkészítésébe fogott az űrbéli kolóniákról, olyanokról, amelyet a *Csillagok között*-ben is láthatunk. Vizsgálata, illetve az ebből kinőtt, általa vezetett NASA-kutatás eredményei a *The High Frontier: Human Colonies in Space* című figyelemre méltó munkában (O'Neill 1978) jelentek meg, amelynek elolvasását melegen ajánlom. Figyeljünk azonban Freeman Dyson könyvhöz írt bevezetőjére is, amelyben azt fejtegeti, hogy O'Neill űrkolóniákról szóló álmának megvalósulása a szerző életében lehetetlen, esély csak a távoli jövőben nyílhat rá.

NÉHÁNY SZAKMAI MEGJEGYZÉS

Az univerzumot irányító fizikai törvények a matematika nyelvén íródtak. A matematikában járatos olvasók számára a következőkben a fizikai törvényekből származtatott formulák segítségével megmutatom, hogyan született a könyv néhány megállapítása. A képletekben leggyakrabban megjelenő két fizikai mennyiség a $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ fénysebesség, és a $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg/s}^2$ Newton-féle gravitációs állandó. A tudományban megszokott módon a 10^8 azt jelenti, hogy az 1 számjegyet nyolc nulla követi, 100000000, azaz százmillió, a 10^{-11} pedig 0,[tíz nulla] 1, azaz 0,00000000001. Nem törekszem 1 százaléknál nagyobb pontosságra, ezért a számokat csak 2-3 értékes jeggyel adom meg, esetleg csak eggyel, ha a szám nagyon pontatlan.

4. fejezet. Görbült idő, görbült tér és az árapályerők

Einstein időgörbültre vonatkozó törvényének legegyszerűbb, kvantitatív torma a következő: Helyezzünk el két egyforma órát egymás közelében, az általuk érzékelt gravitációs vonzóerő iránya mentén, egymáshoz képest nyugalomban. Jelölje R a járási ütemük közötti relatív eltérést, D a köztük lévő távolságot, g pedig az általuk érzékelt gravitációs gyorsulást (amely a gyorsabban járótól a lassabban járó felé mutat). Ekkor Einstein törvénye szerint $g = Rc^2/D$. A harvardi toronyban végzett Pound—Rebka-kísérletben R naponta 210 pikoszekundum, azaz $2,43 \times 10^{-15}$ volt, a torony D magassága pedig 22,3 méter. Ezeket az értékeket az Einstein-egyenletbe írva $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, ami valóban a földi gravitációs gyorsulás.

6. fejezet. A Gargantua anatómiája

A Gargantuához hasonlóan nagyon gyorsan forgó fekete lyukak esetében a horizontnak a lyuk egyenlítői síkjában mért C kerületét kilométerben a következő formula adja: $C = 2\pi GM/c^2 = 9,3 (M/M_{\text{Nap}})$. Itt M a fekete lyuk, $M_{\text{Nap}} = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$ pedig a Nap tömege. A nagyon lassan forgó fekete lyukak esetében a kerület ennek a kétszerese. A horizont sugara a kerület osztva 2π -vel: $R = GM/c^2 = 1,48 \times 10^8 \text{ km}$ a Gargantuára, amely majdnem pontosan a Föld Nap körüli pályájának a sugara.

A Gargantua tömegét a következőképpen határoztam meg: Miller m tömegű bolygójának felszínén a gravitációs gyorsulás az inverz négyzetes Newton-törvénynek megfelelően $g = GM/r^2$, ahol r a bolygó sugara. A Gargantuával ellentétes és a fekete lyuk felé mutató oldal között a Gargantua árapályereje feszítő gyorsulást okoz (a Gargantua bolygó felszínére és az attól r

távolságra lévő középpontjára gyakorolt gravitációs hatásának különbségeként), amely a következőképpen adható meg: $g_{\text{árapály}} = (2GM/R^3)r$. Itt R a bolygó Gargantua körüli pályájának sugara, amely körülbelül a Gargantua horizontjának sugarával egyezik meg. A bolygó szét fog szakadni, ha ez a feszítő gyorsulás meghaladja a bolygó saját felszíni gravitációs gyorsulását, azaz a $g_{\text{árapály}}$ -nak kisebbnek kell lennie g -nél: $g_{\text{árapály}} < g$. Helyettesítsük a g $g_{\text{árapály}}$ és R kifejezéseit, fejezzük ki a bolygó tömegét sűrűségével az $m = (4\pi/3)r^3\rho$ módon, majd rendezzük át az eredményt, így azt kapjuk, hogy $M < \sqrt{3}c^3 / \sqrt{2\pi G^3\rho}$. Miller bolygójának sűrűségét $\rho = 10000$ kg/m³-re becsülöm (tömör szikla), amelyből a Gargantua tömegére $M < 3,4 \times 10^{38}$ kg adódik, ez körülbelül 200 millió naptömeg, ehelyett azonban a 100 millió naptömeget választottam.

Einstein relativisztikus egyenletei alapján meghatároztam egy formulát, amely összekapcsolja a Miller bolygóján tapasztalható $S = 1$ óra/ (hét év) $\times 1,63 \times 10^{-5}$ időlassulást azzal az a paraméterrel, amely azt adja meg, hogy a Gargantua forgási üteme mennyivel kisebb a lehetséges maximális értéknél: $\alpha = 16S^3 / (3\sqrt{3})$. A formula csak nagyon gyors forgás esetén helyes. Az S értékét beírva $\alpha = 1,3 \times 10^{-14}$ adódik, azaz a Gargantua forgási üteme a lehetséges legnagyobb értéknél annak körülbelül tízbiliárdod részével kisebb.

8. fejezet. A Gargantua megjelenítése

A fénysugarak Gargantua körüli pályáit leíró, Oliver Jamesnek (Double Negative) elküldött egyenletek Levin és Perez-Giz (2008) cikkének A függelékében megtalálható egyenletek módosított változatai. A fénynyalábok fejlődését meghatározó egyenleteink Pineult és Roeder két cikkében (1977a, 1977b) közölt formulák módosításai. Paul Franklin csoportjával további cikkekben tárgyaljuk majd speciális egyenleteinket és az azok alapján végrehajtott szimulációk részleteit, amelyek a <http://arxiv.org/find/gr-qc> oldalról kiindulva lesznek majd elérhetők. [Ezek közül kettő már meg is jelent. *(A fordító megjegyzése)*]

12. fejezet. Légszomj

A következőkben a 12. fejezetben olvasható állításaimat alátámasztó számításokat mutatom be. Szép példát szolgáltatnak arra, hogy a tudósai hogyan végeznek becslést. A számok erősen közelítő értékek, ezért csak egy jegyre adom meg azokat.

A Föld légkörének tömege 5×10^{18} kg, ennek körülbelül 80 százaléka nitrogén, 20 százaléka pedig molekuláris oxigén, így az O_2 tömege 1×10^{18} kg. A még el nem bomlott növényi szervezetekben lévő szén (a geofizikusok „szerves szénnek” hívják) mennyisége körülbelül 3×10^{55} kg, amelynek nagyjából fele az óceánok felszíni rétegeiben, fele pedig a szárazföldön található (Hedges és Keil [1993] 1. táblázata). Mindkét helyen átlagosan harminc év alatt oxidálódik (és

alakul CO₂-vé). Mivel a CO₂-ben két oxigénatom van, amelyek a légkörből származnak, és csak egy szénatom, egy oxigén-atom tömege pedig a szénatom tömegének 16/12-szerese, az összes növény elpusztulása után a teljes szénmennyiség oxidációja $2 \times (16/12) \times (3 \times 10^{15} \text{ kg}) = 1 \times 10^{16} \text{ kg O}_2$ -t igényelne, ami a légköri oxigén mennyiségének 1 százaléka.

A földi óceánok hirtelen árkeveredésének bizonyítékait és ennek lehetséges okait taglaló elméletet Adkins, Ingersoll és Pasquero (2005) cikkében olvashatjuk. Az óceánfenéki üledék szerves széntartalmára vonatkozó sztenderd becslések a felső, az óceáni áramlások és az állati tevékenység által összekevert üledékrétegre fókuszálnak, amelynek anyagát az óceánok átkeveredése a felszínre hozhatja. Ennek a kevert rétegnek a széntartalma a szén üledékbe kerülési ütemének (körülbelül 10^{11} kg évenként) és a tengervízből származó oxigénnel történő oxidációja átlagos idejének (1000 év) szorzataként $1,5 \cdot 10^{14} \text{ kg}$, huszada a szárazföldi és az óceánok felső vízrétegében képződőnek (Emerson-Hedges 1988, Hedges-Keil 1995). De: (i) A becsült lerakodási ütemet akár óriási hiba is terhelheti, például Baumgart és mtsai (2009) egy kiterjedt mérésorozatra alapozva becsülték meg a lerakodási ütemet az Indiai-óceánban Jáva és Szumátra partjainál, amelynek a bizonytalansága kb. 1,7 nagyságrend (a minimum- és maximumérték között 50-es szorzó van), és ha ezt extrapolálják az egész óceánra, akkor a kevert rétegben akár $3 \times 10^{15} \text{ kg}$ szén is lehet, ami már megegyezik a szárazföldi és a felszíni vízrétegek széntartalmával, (ii) A kevert rétegben felgyülemlett szén számottevő része az üledék alsóbb rétegeibe süllyedhet, amely így nem keveredik tengervízzel, és nem is oxidálódik, eltekintve a hirtelen óceáni átkeveredések időszakaitól. Úgy véljük, hogy az utolsó ilyen átkeveredés a legutolsó jégkorszak alatt, mintegy 20 000 évvel ezelőtt következett be - ez hússzor annyi, mint az oxidációs idő a kevert rétegben. Így a nem keveredett rétegben hússzor annyi szerves szén lehet, mint a kevert rétegben, és hússzor annyi, mint a szárazföldön és a felső vízrétegekben. Ha ez a következő átkeveredés során a felszínre jutna és ott oxidálna, már majdnem elegendő lenne ahhoz, hogy mindenki megfulladjon oxigénhiány vagy CO₂-mérgezés következtében, lásd a 12. fejezet végét. Tehát egy ilyen forgatókönyv elképzelhető, de persze nagyon valószínűtlen.

15. fejezet. A *Csillagok között* féregjáratának megjelenítése

Christopher Nolan a *Csillagok között* féregjáratának átmérőjét néhány kilométernek választotta. A féreglyuk Földről érzékelhető szögátmérője radiánban ez a méret osztva a távolságai, ami 9csillagászati egység vagy $1,4 \times 10^9 \text{ km}$ (a Szaturnusz pályájának sugara). Így a féregjárat szögátmérője körülbelül $(2 \text{ km}) / (1,4 \times 10^9 \text{ km}) = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ radián}$, azaz 0,0003 ívmásodperc. Transzkontinentális interferometrikus üzemmódban a rádióteleszkóp-hálózatok rutinszerűen képesek ilyen felbontásra. A Hubble-űrtávcső és az ún. adaptív optikával felszerelt

földi teleszkópok felbontása azonban 2014-ben még mintegy százszor rosszabb ennél. A hawaii Keck ikertávcsövek interferometrikus üzemmódjában már csak tízszer rosszabb a felbontás, mint a féregjárat szájának szögátmérője, és nagyon valószínű, hogy a *Csillagok között* korában az egymástól még távolabb elhelyezett optikai távcsövekkel a 0,0003 ívmásodpercnél is jobb felbontást lehet majd elérni.

17. fejezet. Miller bolygója

Ha tisztában vagyunk a Newton-féle gravitációs törvény matematikai formalizmusával, akkor érdekes olvasmány lehet számunkra Bohdan Paczynski és Paul Wiita asztrofizikusok munkája (Paczynski-Wiita, 1980), amelyben a Newton-féle inverz négyzetes törvényt egy nem forgó fekete lyuk gravitációs terének leírásához a következőképpen módosítják: $g = GM/r^2 \rightarrow g = GM/(r - r_h)^2$. Itt a lyuk tömege, r az a külső sugár, ahol a gravitációs gyorsulás g , $r_h = 2GM/c^2$ pedig a nem forgó fekete lyuk eseményhorizontjának sugara. Az ezzel a módosítással kapott gravitációs gyorsulás meglepően jól egyezik az általános relativitáselmélet által jósolt értékkel⁹¹. A módosított gravitációs törvény segítségével próbálkozzunk meg a 17.2. ábra⁹² kvantitatív értelmezésével és a Miller-bolygó pályasugarának meghatározásával! Az eredmény persze csak közelítő érték lesz, mivel a Gargantua gravitációjának Paczynski-Wiita-féle leírása nem veszi figyelembe, hogy a forgó fekete lyuk örvénylő mozgásba sodorja a teret maga körül.

25. fejezet. A professzor egyenlete

A professzor egyenletében szereplő különböző matematikai szimbólumok (25.6. ábra) jelentésének magyarázata a tizenöt másik táblán látható, amelyek megtalálhatók a könyv honlapján, az Interstellar.withgoogle.com oldalon. Az egyenlet az $\mathcal{L}$ Lagrange-függvény integráljaként adja meg az S „hatást” (a kvantummechanikai „effektív hatás” klasszikus határesetét). A Lagrange-függvényben szerepel az ötdimenziós befoglaló tér és négydimenziós bránunk téridejének geometriája („metrika”), a befoglaló tér Q , σ , λ , ξ , és φ betűkkel jelölt erőtereknek csoportja, illetve a bránunkban működő „standard modellterek” (beleértve az elektromos és mágneses mezőket is). Az erőtereket és a téridő metrikáját úgy kell „variálni”, hogy

⁹¹ A gravitációs törvény Paczynski-Wiita-féle módosítását használták abban a Csillagok között-höz kapcsolódó videojátékban, amellyel a fekete lyuknak az űreszközök pályájára gyakorolt gravitációs lendítő hatását lehet szimulálni.

⁹² A kapcsolódó számításokat lásd a 27. fejezetre vonatkozó szakmai megjegyzésekben.

az S hatásnak szélsőértéke (maximuma, minimuma vagy nyeregpontja) legyen. A szélsőértéket előállító feltételek az Euler-Lagrange-egyenletekből adhatók meg, ezek kontrollálják a mezők fejlődését. Az eljárás az ún. variációs számítás alapfeladata. A professzor és Murph feltevésekkel éltek a Lagrange-függvényben megjelenő mennyiségekre, a befoglaló tér φ' mezőire, az ismeretlen $U(Q)$, $H_{ij}(Q^2)$, M (standard modellterek) függvényekre és a szintén ismeretlen W_{ij} konstansokra nézve. A 25.9. ábrán én vagyok látható, amint éppen a feltevéseik listáját írom a táblára. A feltevések mindegyik halmazára a mezők és a téridőgeometria variálásával származtatták az Euler-Lagrange-egyenleteket, majd számítógépes szimulációkkal megvizsgálták az egyenletek gravitációs anomáliákra vonatkozó előrejelzéseit.

27. fejezet. A vulkán pereme

Ezt a megjegyzése azon olvasóknak ajánljuk, akik járatosak a New-ton-féle gravitációs törvény, valamint az energia- és impulzusnyomaték megmaradásának matematikai leírásában. Arra biztatom őket, hogy próbálják meg levezetni a következő, vulkánhoz hasonló felületre vonatkozó formulát (i) a Gargantua gravitációs gyorsulásának Paczynski-Wiita-féle $g = GM/(r - rh)^2$ közelítése (lásd a 17. fejezethez kapcsolódó megjegyzést feljebb), valamint (ii) az energia- és az impulzusnyomaték-megmaradás törvényének felhasználásával. Ha L az *Endurance* impulzusnyomatéka (tömegegységre vonatkoztatva), akkor a formula a 17. fejezet szakmai megjegyzésének jelöléseivel a következő.

$$V(r) = -\frac{GM}{r - r_h} + \frac{1}{2} \frac{L^2}{r^2}$$

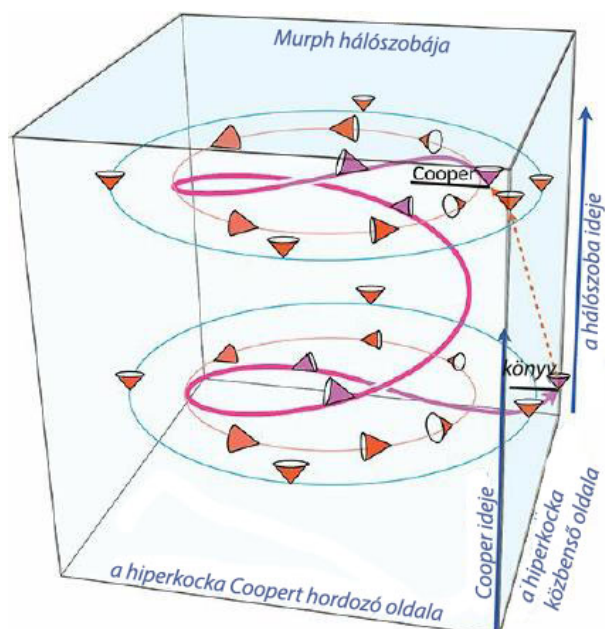
Az első tag az *Endurance* gravitációs energiája (tömegegységre vonatkoztatva), második a körmozgásának kinetikus energiája, a $V(r)$ és a $v^2/2$ (v a radiális sebessége) radiális energiának az összege pedig az *Endurance* megmaradó teljes energiája (szintén tömegegységre vonatkoztatva). A vulkán pereme annál az r sugárnál van, ahol $V(r)$ maximális. Ezen egyenletek és ötletek felhasználásával próbálkozzunk meg az *Endurance* trajektóriájával, a vulkánperemen futó trajektória stabilitásával és az Edmunds bolygójára való indulással kapcsolatban a 27. fejezetben megfogalmazott állításaim igazolásával.

30. fejezet. Üzenet a múltba

A befoglaló térben és bránunkban is az üzenetek vagy bármilyen más dolog csak a téridő azon helyeire juthatnak el, amelyek megfelelnek annak a törvénynek, hogy semmi sem haladhat gyorsabban a félynél. Mi, fizikusok téridődiagramokat használunk ezen

törvény következményeinek felmérésére. Ezeken a diagramokon minden eseményhez tartozik egy „jövőbeli fénykúp”. Az eseményből induló fénysugarak a kúp palástja mentén haladnak, minden más, a félynél lassúbb dolog pedig a kúppaláston belül. A részleteket lásd például a *Gravity: An Introduction to Einstein's Central Relativity* (Hartie 2003) című munkában.

A Szm. 1. ábra jövőbeli fénykúpok sorozatát mutatja a hiperkocka belsejében és az oldalain, ahogyan én gondolom a film alapján. (Ez a téridőgörbület azon matematikai leírása, amelyre a 30. fejezet 1-es lábjegyzetében utalok. A fizikusok a fénykúpoknak ezt a mintázatát a hiperkockában a „téridő kauzális szerkezete” megjelöléssel illetik.) A Szm. 1. ábrán berajzoltuk még a Cooper által a hiperkocka belsején át Murph hálósobájába küldött gravitációshullám-üzenet (erő) világvonalát (lila görbe), illetve a hálósobából a hiperkocka oldalain behatoló fénysugarak világvonalát (vörös szaggatott vonal), amelyek segítségével Cooper a hálósobát látja. Az ábra a 30.3. ábra tisztán térszerű diagramjának téridő-változata. A diagram alapján meg tudjuk magyarázni, hogyan lehetséges az, hogy a gravitációshullám-üzenet fénysebességgel halad, mégis visszafelé mozog a hálósoba és Cooper idejéhez képest is? És azt, hogy ezzel ellentétben a fénysebességgel haladó fénysugár miért mozog előre a hálósoba és Cooper idejéhez viszonyítva is? Vessük ezt össze a 30.6. ábrán látható Escher-rajzról leírtakkal.



Szm. 1. ábra.

A téridő kauzális szerkezete a hiperkockán belül, egy térdimenzió elhagyásával

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A hollywoodi kedves fogadtatásért és azért, hogy olyan sok mindenre megtanított erről a figyelemre méltó világról, először és legfőképpen szeretnék köszönetét mondani alkotótársamnak, Lynda Obstnak. Szintén köszönet illeti Christopher Nolant, Emma Thomast, Jonathan Nolant, Paul Franklint és Steven Spielberget.

Köszönet Lyndának barátságért és az együttműködésért, amelyből megszületett a *Csillagok között* első vázlata, és azért, hogy a filmet átsegítette minden megpróbáltatáson és csapáson, hogy az végül Christopher Nolan kezébe kerüljön, aki nagyszerűen megelevenítette.

Köszönettel tartozom Paul Franklinnek, Oliver Jamesnek és Eugénie von Tunzelmann-nak, amiért bevezettek a vizuális effektusok világába, és biztosították a lehetőséget, hogy megalapozhassam a *Csillagok között* féregjáratának, valamint a Gargantua fekete lyuknak és akkréciós korongjának vizuális megjelenését, Olivernek és Eugénie-nek pedig külön is azért, hogy szorosan együttműködtek velem ebben a munkában.

A könyv kéziratával kapcsolatos bölcs tanácsaikért és megjegyzéseikért köszönet illeti a következőket: Lynda Obst, Jeff Shreve, Emma Thomas, Christopher Nolan, Jordán Goldberg, Paul Franklin, Oliver James, Eugénie von Tunzelmann és Carol Rose. A kézirat minden sorának pontossága és igazsága iránti makacs és kitartó elkötelezettségükért köszönettel tartozom Leslie Huangnak és Don Rifkinnek. Köszönöm Jordán Goldberg, Eric Lewy, Jeff Shreve, Juha Druskin, Joe Lops, Lia Halloran és Andy Thompson ábrákkal kapcsolatos nélkülözhetetlen segítségét és/vagy tanácsait. Az ábrák közlési jogainak megszerzésében nyújtott, szintén nélkülözhetetlen közreműködéséért köszönet illeti Fát Holtt. Az, hogy a könyv végül valósággá vált, jelentős részben Drake McFeely, Jeti Shreve, Amy Cherry, valamint hollywoodi ügyvédek, Eric Sherman és Ken Zirfren érdeme. (Igen, majdnem mindenkinek, aki Hollywoodban dolgozik, szüksége van ügyvédre vagy ügynökre, még a „pálya széléről bekiabáló” tudósok is.)

A nagy kalandban nyújtott támogatásáért és türelméért örök hálával tartozom feleségemnek, életem párjának, Carolee Winstein-nek.

IRODALOMJEGYZÉK

- Abbott, E. A. (1884). *Flatland* (Dover Thrift Edition 1992, New York); widely available on the web, for example at [http://en.wikisource.org/wiki/Flatland_\(second_edition\)](http://en.wikisource.org/wiki/Flatland_(second_edition)).
- Adkins, J. F., Ingersoll, A. P., and Pasquero, C. (2005). "Rapid Climate Change and Conditional Instability of the Glacial Deep Ocean from the Thermobaric Effect and Geothermal Heating," *Quaternary Science Reviews*, **24**, 581–594.
- Al-Khalili, J. (2012). *Black Holes, Wormholes, and Time Machines*, 2nd edition (CRC Press, Boca Raton, Florida).
- Barrow, J. D. (2011). *The Book of Universes: Exploring the Limits of the Cosmos* (W. W. Norton, New York).
- Bartusiak, M. (2000). *Einstein's Unfinished Symphony: Listening to the Sounds of Space-Time* (The Berkeley Publishing Group, New York).
- Baum, R., and Sheehan, W. (1997). *In Search of the Planet Vulcan: The Ghost in Newton's Clockwork Universe* (Plenum Trade, New York).
- Baumgart, A., Jennerjahn, T., Mohtadi, M., and Hebbeln, D. (2010). "Distribution and Burial of Organic Carbon in Sediments from the Indian Ocean Upwelling Region Off Java and Sumatra, Indonesia," *Deep-Sea Research I*, **57**, 458–467.
- Begelman, M., and Rees, M. (2009). *Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe*, 2nd edition (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Billings, L. (2013). *Five Billion Years of Solitude: The Search for Life Among the Stars* (Penguin Group, New York).
- Brans, C. (2010). "Varying Newton's Constant: A Personal History of Scalar-Tensor Theories," *Einstein Online*, 1002; available at <http://www.einstein-online.info/spotlights/scalar-tensor>.
- Carroll, S. (2011). *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time* (Oneworld Publications, Oxford, England).
- Carroll, S. (2014). *Preposterous Universe*, <http://www.preposterousuniverse.com/blog/>.
- Choptuik, M. W. (1993). "Universality and Scaling in Gravitational Collapse of a Massless Scalar Field," *Physical Review Letters*, **70**, 9.
- Davies, P.C.W., and Brown, J. R. (1986). *The Ghost in the Atom: A Discussion of the Mysteries of Quantum Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Dyson, F. J. (1963). "Gravitational Machines," in *Interstellar Communication*, edited by A.G.W. Cameron (W. A. Benjamin, New York), pp. 115–120.

- Dyson, F. J. (1968). "Interstellar Transport," *Physics Today*, October 1968, pp. 41–45.
- Ehlinger, L. (2007). *Flatland: The Film*, currently available on YouTube at <http://www.youtube.com/watch?v=eyuNrm4VK2w>; see also <http://www.flatlandthefilm.com>.
- Emerson, S., and Hedges, J. I. (1988). "Processes Controlling the Organic Carbon Content of Open Ocean Sediments," *Paleoceanography*, **3**, 621–634.
- Everett, A., and Roman, T. (2012). *Time Travel and Warp Drives* (University of Chicago Press, Chicago).
- Feynman, R. (1965). *The Character of Physical Law* (British Broadcasting System, London); paperback edition (MIT Press, Cambridge, Massachusetts).
- Forward, R. (1962). "Pluto—the Gateway to the Stars," *Missiles and Rockets*, **10**, 26–28.
- Forward, R. (1984). "Roundtrip Interstellar Travel Using Laser-Pushed Lightsails," *Journal of Spacecraft and Rockets*, **21**, 187–195.
- Foucart, F., Duez, M. D., Kidder, L. E., and Teukolsky, S. A., "Black Hole–Neutron Star Mergers: Effects of the Orientation of the Black Hole Spin," *Physical Review D* **83**, 024005 (2011); also available at <http://arXiv:1007.4203>.
- Freeze, K. (2014). *The Cosmic Cocktail: Three Parts Dark Matter* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey).
- Gamow, G. (1947). *One, Two, Three . . . Infinity: Facts and Speculations of Science* (Viking Press, New York; now available from Dover Publications, Mineola, New York).
- Gregory, R., Rubakov, V. A., and Sibiryakov, S. M. (2000). "Opening Up Extra Dimensions at Ultra-Large Scales," *Physical Review Letters*, **84**, 5928–5931; available at <http://lanl.arxiv.org/abs/hep-th/0002072v2>.
- Greene, B. (2003). *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, 2nd edition (W. W. Norton, New York).
- Greene, B. (2004). *The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality* (Alfred A. Knopf, New York).
- Guillochon, J., Ramirez-Ruiz, E., Rosswog, S., and Kasen, D. (2009). "Three-Dimensional Simulations of Tidally Disrupted Solar-Type Stars and the Observational Signatures of Shock Breakout," *Astrophysical Journal*, **705**, 844–853.
- Guth, A. (1997). *The Inflationary Universe* (Perseus, New York).
- Hartle, J. (2003): *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity* (Pearson, Upper Saddle River, New Jersey).
- Hawking, S. (1988). *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes* (Bantam Books, New York).
- Hawking, S. (2001). *The Universe in a Nutshell* (Bantam Books, New York).
- Hawking, S., and Mlodinow, L. (2010). *The Grand Design* (Bantam Books, New York).

- Hawking, S., Novikov, I., Thorne, K. S., Ferris, T., Lightman, A., and Price, R. (2002). *The Future of Spacetime* (W. W. Norton, New York).
- Hawking, S., and Penrose, R. (1996). *The Nature of Space and Time* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey).
- Hedges, J. I., and Keil, R. G. (1995). "Sedimentary Organic Matter Preservation: An Assessment and Speculative Synthesis," *Marine Chemistry*, **49**, 81–115.
- Isaacson, W. (2007). *Einstein: His Life and Universe* (Simon & Schuster, New York).
- Kennefick, D. (2007). *Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey).
- Lemonick, M. (2012). *Mirror Earth: The Search for Our Planet's Twin* (Walker, New York).
- L'Engle, M. (1962). *A Wrinkle in Time* (Farrar, Strauss and Giroux, New York).
- Levin, J., and Perez-Giz, G. (2008). "A Periodic Table for Black Hole Orbits," *Physical Review D*, **77**, 103005.
- Lynden-Bell, D. (1969). "Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars," *Nature*, **223**, 690–694.
- Maartens, R., and Koyama K. (2010). "Brane-World Gravity," *Living Reviews in Relativity* **13**, 5; available at <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2010-5/>.
- Marolf, D., and Ori, A. (2013). "Outgoing Gravitational Shock-Wave at the Inner Horizon: The Late-Time Limit of Black Hole Interiors," *Physical Review D*, **86**, 124026.
- McKinney, J. C., Tchekhovskoy, A., and Blandford, R. D. (2012). "Alignment of Magnetized Accretion Disks and Relativistic Jets with Spinning Black Holes," *Science*, **339**, 49–52; also available at <http://arxiv.org/pdf/1211.3651v1.pdf>.
- McMullen, C. (2008). *The Visual Guide to Extra Dimensions*. Volume 1: *Visualizing the Fourth Dimension, Higher-Dimensional Polytopes, and Curved Hypersurfaces* (Custom Books).
- Meier, D. L. (2012). *Black Hole Astrophysics: The Engine Paradigm* (Springer Verlag, Berlin).
- Merritt D. (2013). *Dynamics and Evolution of Galactic Nuclei* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey).
- Misner, C. W., Thorne, K. S., and Wheeler, J. A. (1973). *Gravitation* (W. H. Freeman, San Francisco).
- Nahin, P. J. (1999). *Time Machines: Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*, 2nd edition (Springer Verlag, New York).
- Obst, L. (1996). *Hello, He Lied: & Other Truths from the Hollywood Trenches* (Little, Brown, Boston).
- Obst, L. (2013). *Sleepless in Hollywood: Tales from the New Abnormal in the Movie Business* (Simon & Schuster, New York).

- O'Neill, G. K. (1978). *The High Frontier: Human Colonies in Space* (William Morrow, New York; 3rd edition published by Apogee Books, 2000).
- Paczynski, B., and Wiita, P. J. (1980). "Thick Accretion Disks and Supercritical Luminosities," *Astronomy and Astrophysics*, **88**, 23–31.
- Pais, A. (1982). *"Subtle Is the Lord . . .": The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford University Press, Oxford, England).
- Panek, R. (2011). *The 4% Universe: Dark Matter, Dark Energy, and the Race to Discover the Rest of Reality* (Houghton Mifflin Harcourt, New York).
- Penrose, R. (2004). *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe* (Alfred A. Knopf, New York).
- Perryman, M. (2011). *The Exoplanet Handbook* (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Pineault, S., and Roeder, R. C. (1977a). "Applications of Geometrical Optics to the Kerr Metric. I. Analytical Results," *Astrophysical Journal*, **212**, 541–549.
- Pineault, S., and Roeder, R. C. (1977b). "Applications of Geometrical Optics to the Kerr Metric. II. Numerical Results," *Astrophysical Journal*, **213**, 548–557.
- Poisson, E., and Israel, W. (1990). "Internal Structure of Black Holes," *Physical Review D*, **41**, 1796–1809.
- Randall, L. (2006). *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions* (HarperCollins, New York).
- Rees, M., ed. (2005). *Universe: The Definitive Visual Guide* (Dorling Kindersley, New York).
- Roseveare, N. T. (1982). *Mercury's Perihelion from Le Verriere to Einstein* (Oxford University Press, Oxford, England).
- Schutz, B. (2003). *Gravity from the Ground Up: An Introductory Guide to Gravity and General Relativity* (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Schutz, B. (2009). *A First Course in General Relativity*, 2nd edition (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Singh, P. S. (2004). *Big Bang: The Origin of the Universe* (HarperCollins, New York).
- Shostak, S. (2009). *Confessions of an Alien Hunter: A Scientist's Search for Extraterrestrial Intelligence* (National Geographic, Washington, DC).
- Stewart, I. (2002). *The Annotated Flatland: A Romance of Many Dimensions* (Basic Books, New York).
- Teo, E. (2003). "Spherical Photon Orbits Around a Kerr Black Hole," *General Relativity and Gravitation*, **35**, 1909–1926;

available at <http://www.physics.nus.edu.sg/~phyteoe/kerr/paper.pdf>.

Thorne, K. S. (1994). *Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* (W. W. Norton, New York).

Thorne, K. S. (2002). "Spacetime Warps and the Quantum World: Speculations About the Future," in Hawking et. al. (2002).

Thorne, K. S. (2003). "Warping Spacetime," in *The Future of Theoretical Physics and Cosmology: Celebrating Stephen*

Hawking's 60th Birthday, edited by G. W. Gibbons, S. J. Rankin, and E.P.S. Shellard (Cambridge University Press,

Cambridge, England), Chapter 5, pp. 74–104.

Toomey, D. (2007). *The New Time Travelers: A Journey to the Frontiers of Physics* (W. W. Norton, New York).

Visser, M. (1995). *Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking* (American Institute of Physics, Woodbury, New York).

Vilenkin, A. (2006). *Many Worlds in One: The Search for Other Universes* (Hill and Wang, New York).

Wheeler, J. A., and Ford, K. (1998). *Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics* (W. W. Norton, New York).

Will, C. M. (1993). *Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test* (Basic Books, New York).

Witten, E. (2000). "The Cosmological Constant from the Viewpoint of String Theory," available at <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0002297>.

Yang, H., Zimmerman, A., Zenginoglu, A., Zhang, F., Berti, E., and Chen, Y. (2013). "Quasinormal Modes of Nearly Extremal Kerr

Spacetimes: Spectrum Bifurcation and Power-Law Ringdown," *Physical Review D*, **88**, 044047.

Képek- ábrák forrása

Following figures © Warner Bros. Entertainment Inc.: 1.2, 1.3, [3.4](#), 3.6, 5.6, 8.1, 8.5, 8.6, 9.7, 9.9, 9.10, 9.11, 11.1, 14.9, 15.2,

15.4, 15.5, 17.5, 17.9, 18.1, 19.2, 19.3, 20.1, 20.2, 24.5, 25.1, 25.7, 25.8, 25.9, 27.8, 28.3, 29.8, 29.14, 30.1, 31.1

Following figures © Kip Thorne: 2.4, 2.5, 3.2, 3.5, 4.3, 4.4, 4.8, 4.9, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 7.1, 7.2, 7.3, 7.5, 8.2,

8.7, 9.8, 13.4, 13.5, 13.6, 14.5, 15.1, 15.3, 16.2, 16.5, 16.8, 17.1, 17.2, 17.3, 17.4, 17.6, 19.1, 21.3, 22.2, 22.3, 22.4, 23.2, 23.5,

23.6, 23.7, 23.8, 24.1, 24.4, 24.6, 24.7, 25.2, 25.3, 25.5, 25.6, 26.5, 26.10, 26.11, 26.12, 26.13, 27.1, 27.3, 27.6, 27.10, 28.2, 29.1,

29.2, 29.12, 30.2, 30.3, 30.4, TN.1

[1.1](#): Carolee Winstein

1.2: Melinda Sue Gordon. © Warner Bros.

[1.3](#): Tyler Ott

[1.4](#): Rosie Draper

[2.1](#): NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (Racah Institute of Physics/The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team, and ESA

[2.2](#): Adam Evans, www.sky-candy.ca

[2.3](#): Courtesy of NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams

[2.6](#): Property of the estate of Matthew H. Zimet. Courtesy Eva Zimet

[2.7](#): © Best View Stock/Alamy

[2.8](#): Image of Earth: NASA

[2.9](#): © Picture Press/Alamy

[2.10](#): © Russell Kightley/Science Source

[2.11](#): Image of Earth: NASA

3.1: Waldseemüller map: map image courtesy of the Norman B. Leventhal Map Center at the Boston Public Library/Sidney

R. Knafel Collection at Phillips Academy, Andover, MA. Ortelius map: from Library of Congress Geography and Map

Division Washington, D.C. Bowen map: Geographicus Rare Antique Maps

[3.3](#): Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann and Oliver James.

3.6: Kip Thorne. © Warner Bros.

4.2: United States Government, adapted by Kip Thorne

4.5: © Lia Halloran, www.liahalloran.com

4.6: © Lia Halloran and Kip Thorne

4.7: © Lia Halloran and Kip Thorne

5.5: Courtesy NASA/JPL-Caltech

5.6: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann and Oliver James.

5.7: Karl Schwarzschild: photograph by Robert Bein, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives. Roy Kerr: Roy P. Kerr.

Stephen Hawking: © Richard M. Diaz. Robert Oppenheimer: en.wikipedia.org—J._Robert_Oppenheimer. Andrea Ghez: Mary Watkins (UCLA)

5.8: Keck/UCLA Galactic Center Group; Andrea Ghez

5.9: Akira Fujii/ESA/Hubble

6.5: © Kip Thorne, patterned after illustrations by Edward Teo (2003)

7.4: Left: © Robert Gendler (robgendlerastropics.com). Right: © Kip Thorne

7.6: Steve Drasco, assistant professor of physics, California Polytechnic State University, San Luis Obispo

7.7: Courtesy NASA/JPL-Caltech

8.1: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann and Oliver James.

8.3: Star field image: Alain Riazuelo, IAP/UPMC/CNRS; drawing: Kip Thorne. Movie camera icon courtesy basarugur

8.4: Star field image: Alain Riazuelo, IAP/UPMC/CNRS; drawing: Kip Thorne

8.5: Image: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann and Oliver James; drawing: Kip Thorne. © Warner

Bros. and Kip Thorne

8.6: Image: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann and Oliver James; drawing: Kip Thorne. © Warner

Bros. and Kip Thorne. Movie camera icon courtesy basarugur

9.1: Photo: NASA/STScI. Spectrum: Maarten Schmidt

9.2: Property of the estate of Matthew H. Zimet. Courtesy Eva Zimet

9.3: Property of the estate of Matthew H. Zimet. Courtesy Eva Zimet

9.4: Property of the estate of Matthew H. Zimet. Courtesy Eva Zimet

9.5: James Guillochon

9.6: James Guillochon

9.7: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann and Oliver James.

- 9.8: Movie camera icon courtesy basarugur. © Kip Thorne
- 9.9: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann and Oliver James.
- 10.1: Steve Drasco, assistant professor of physics, California Polytechnic State University, San Luis Obispo
- 11.2: NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center/Giovanni. Special thanks to James G.

Acker.

- 13.1: © Kip Thorne and Richard Powell, www.atlasoftheuniverse.com
- 13.2: Freeman Dyson
- 13.3: Copyright © American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 1983. All rights reserved.
- 14.1: Apple © Preto Perola/Shutterstock.com. Ant: © Katarzyna Cielecka/Fotalia.com
- 14.2: Wormhole drawing on left previously published in Misner, Thorne, and Wheeler (1973); remainder of

figure: Kip Thorne

- 14.3: Property of the estate of Matthew H. Zimet. Courtesy Eva Zimet
- 14.4: Property of the estate of Matthew H. Zimet. Courtesy Eva Zimet
- 14.6: Left: © Catherine MacBride. Right: © Mark Interrante
- 14.7: Property of the estate of Matthew H. Zimet. Courtesy Eva Zimet
- 14.8: Property of the estate of Matthew H. Zimet. Courtesy Eva Zimet
- 15.2: Left: Kip Thorne. Right: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann and Oliver James. ©

Warner Bros.

and Kip Thorne

- 15.4: Left: Kip Thorne. Right: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann and Oliver James. ©

Warner Bros.

and Kip Thorne

- 16.1: Photos courtesy of the LIGO Laboratory
- 16.3: Courtesy of the LIGO Laboratory
- 16.4: Images produced by Robert McGehee, Ian MacCormack, Amin Nikbin, and Keara Soloway from a simulation

by F.

Foucart et al. (2011)

- 16.6: © Lia Halloran, www.liahalloran.com
- 16.7: Image courtesy Robert Owen, Department of Physics and Astronomy, Oberlin College
- 16.9: Figure courtesy SXS collaboration, www.black-holes.org
- 16.10: Steffen Richter
- 17.7: Top: © Xinhua/Xinhua Press/Corbis. Bottom: © AFLO/Nippon News/Corbis
- 17.8: NASA/JPL/University of Arizona
- 18.1: Data: Huan Yang, Aaron Zimmerman; image: Oliver James and Eugénie von Tunzelmann. © Warner Bros.
- 21.1: Courtesy NASA/JPL-Caltech
- 21.2: Left: courtesy John Schwarz. Right: Steve Jennings/Getty Images
- 22.1: History of Science Collection, John Hay Library, Brown University
- 23.1: Image of Sun: Courtesy of NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams.
- 23.4: Randall photo: © Tsar Fedorsky, 2014. Sundrum photo: Raman Sundrum, professor of theoretical physics,

University of

Maryland, College Park

- 24.2: NASA/JPL-Caltech/GSFC/SDSS
- 24.3: Andrew Fruchter (STScI) et al., WFPC2, HST, NASA
- 24.8: NASA/JPL
- 25.1: Melinda Sue Gordon. © Warner Bros.
- 25.4: ESA-GOCE High Level Processing Facility
- 25.7: Kip Thorne. © Warner Bros.
- 25.8: Melinda Sue Gordon. © Warner Bros.
- 26.1: Released into the public domain by PoorLeno
- 26.2: Photo courtesy of the LIGO Laboratory
- 26.3: Property of the estate of Matthew H. Zimet. Courtesy Eva Zimet

26.4: ChrisVanLennepPhoto/Shutterstock.com

26.6: © Stephen Hawking, John Preskill, Kip Thorne

26.7: Left: © Matthew W. Choptuik 2000. Middle and right: © Kip Thorne

26.8: Photo by Irene Fertik 1997

26.9: © Lia Halloran, www.liahalloran.com

27.2: Kip Thorne for drawing; Double Negative for image of Endurance. © Kip Thorne and Warner Bros.

27.4: Jeff Darling, www.diseno-art.com

27.5: Kip Thorne for drawing; Double Negative for image of Endurance. © Kip Thorne and Warner Bros.

27.7: Kip Thorne for drawing; Double Negative for image of Endurance. © Kip Thorne and Warner Bros.

27.9: Kip Thorne for drawing; Double Negative for image of Endurance. © Kip Thorne and Warner Bros.

28.1: Kip Thorne for drawing; Double Negative for image of Endurance. © Kip Thorne and Warner Bros.

28.4: Drawing © Kip Thorne. Floating man adapted from illustration by Cameron D. Bennett

29.3: Tesseract: "Hypercube." Licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 via Wikimedia

Commons—

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hypercube.svg#mediaviewer/File:Hypercube.svg>, adapted by Kip Thorne.

Floating man: illustration by Cameron D. Bennett

29.4: Image of stars and galaxies: my distortion of Figure 2.1, which is courtesy NASA, N. Benitez (JHU), T.

Broadhurst

(Racah Institute of Physics/The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team, and ESA. Shadow of floating man is adapted from illustration by Cameron D. Bennett

29.5: Drawing © Kip Thorne. Floating man adapted from illustration by Cameron D. Bennett. Girl adapted from illustration

by Kamenetskiy Konstantin/Shutterstock.com

29.6: Tesseract: "Hypercube." Licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 via Wikimedia

Commons—

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hypercube.svg#mediaviewer/File:Hypercube.svg>, adapted by Kip Thorne.

Floating man: illustration by Cameron D. Bennett. Standing girl: Kamenetskiy Konstantin/Shutterstock.com.

Lines,

arrows, and text: Kip Thorne

29.7: Drawing © Kip Thorne. Floating man: Cameron D. Bennett. Standing girl: Kamenetskiy

Konstantin/Shutterstock.com

29.9: Drawing © Kip Thorne. Floating man: Cameron D. Bennett. Standing girl: Kamenetskiy

Konstantin/Shutterstock.com

29.10: Drawing © Kip Thorne. Floating man: Cameron D. Bennett. Standing girl: Kamenetskiy

Konstantin/Shutterstock.com

29.11: © Christopher Nolan

29.13: Drawing © Kip Thorne. Floating man: Cameron D. Bennett

30.5: Drawing © Kip Thorne. Shadow of floating man is adapted from an illustration by Cameron D. Bennett

30.6: M. C. Escher's Waterfall © 2014 The M. C. Escher Company–The Netherlands. All rights reserved