

Amir D. Aczel

Isten egyenlete

AKKORD KIADÓ

Az eredeti mű címe:
Amir D. Aczel
God's Equation
Four Walls Eight Windows, New York, 1999

Fordította: Erdeős Zsuzsanna

Lektor: Abonyi Iván

Szerkesztette: Oláh Judit

Fedélterv: Kállai Nagy Krisztina

Copyright © 1999 Amir Aczel
Hungarian translation © Erdeős Zsuzsanna, 2004
Hungarian edition © Akkord Kiadó, 2004

Minden jog fenntartva. A könyv bármely részlete csak a kiadó előzetes engedélyével használható fel.

ISBN 963 9429 52 X
ISSN 1586-8419

Kiadja az Akkord Kiadó Kft.
Felelős kiadó: Földes Tamás
Felelős szerkesztő: Várlaki Tibor
Sorozatszerkesztő: Oláh Vera
Műszaki szerkesztő: Haiman Ágnes
Tördelés: Szmrecsányi Mária

Készült a Borsodi Nyomda Kft.-ben
Felelős vezető: Ducsai György

Édesapámnak, E. L. Aczel kapitánynak

Tartalom

Előszó	6
1. Robbanó csillagok	15
2. A korai Einstein	26
3. Prága, 1911	38
4. Az euklideszi probléma	52
5. Grossmann jegyzetei	68
6. A krími expedíció	77
7. A Riemann-metrika	96
8. Berlin: a téregyenlet	108
9. A Principe-sziget, 1919	124
10. A közös megbeszélés	141
11. Kozmológiai megfontolások	151
12. A tér tágulása	167
13. Az anyag természete	180
14. A világegyetem geometriája	188
15. Illinois állam Batavia városa, 1998. május 4.	195
16. Isten egyenlete	205
Irodalomjegyzék	217
Mutató	218



Albert Einstein 1911. szeptember 21-én Erwin Freundlichnak írt levelezőlapja. Pierpont Morgan könyvtár, New York, MA 4725.

Előszó

1998 januárjában örökre megváltozott a világegyetemről alkotott képünk. A csillagászok bizonyítékot találtak arra, hogy a világmindenség egyre növekvő sebességgel tágul. Amint ezt a felfedezést bejelentették, a kozmológusok a világ minden táján elkezdték keresni, hogy milyen jelenséggel magyarázható ez a csillagászati tény. A legtetszetősebb magyarázat, amit ki tudtak találni, nem volt más, mint az az elmélet, amelyet nyolc évtizeddel ezelőtt Albert Einstein vetett fel, majd vont gyorsan vissza, mint legnagyobb baklövését. Az új kutatások évről évre megerősítik Einstein elméleteinek helyességét. De ha a kozmológusok jól gondolják, Einsteinnek még akkor is igaza volt, amikor biztosan tudta, hogy téved.

Körülbelül ugyanakkor, amikor ez a meghökkentő hír mindenhová eljutott, érdekes dolgot találtam a postaládámban. L. P. Lebel küldte, akivel levelezésben és barátságban állok, amióta elolvasta *Fermat utolsó tétele* című könyvemet. Most viszont nem levél hullott ki a borítékból, hanem egy, a *New York Times*-ből kivágott cikk. A szerzője: George Johnson. Nagy érdeklődéssel olvastam, mert tiszta matematikáról szólt; semmi fizika, semmi kozmológia. A cikkben Johnson a következő érdekes kérdést vetette fel: lehetséges-e, hogy létezik egy másféle – a miénktől különböző – matematika valahol a világegyetemben? Példaként Johnson a π és a kör problémáját vetette fel. Azt kérdezte, vajon elképzelhetőek-e olyan körök, amelyekben a kerület és az átmérő aránya nem π .

Első pillantásra úgy tűnhet, hogy Einsteinnek és a kozmológiának semmi köze nincs egy olyan bizarr matematikához, ahol ilyen furcsa körök létezhetnek. De én tudtam, hogy erős kapcsolat van köztük. Ahhoz, hogy ezt a két párhuzamos – matematikai és fizikai – problémát kapcsolatba tudjam hozni egymással, vissza kellett mennem két évtizedet. Amikor a Kaliforniai Egyetemre, Berkeleybe jártam, mindkét tantárgyból vettem fel órákat. Ezen órák egyikén az előadó egy olyan fogalommal ismertetett meg bennünket, ami megváltoztatta a világszemléletemet.

– Az elektron – mondta a professzor – egy másik, a miénktől különböző térben létezik.

Ez volt az az állítás, amely eltérített az eddigi tanulmányaimtól. Ettőlfogva olyan órákra jártam, ahol a különféle terekről volt szó: topológiára, analízisre és differenciálgeometriára. Szerettem volna megérteni ezeket a tereket, amelyek akkor is ott vannak, ha érzékszerveinkkel nem észleljük őket. Ilyen furcsa terek vannak mind a nagyon kicsivel (a kvantummechanikával), mind a nagyon naggyal (az általános relativitáselmélettel) foglalkozó tudományokban. Ha például a relativitáselmélet fizikáját szeretné valaki megérteni, egy olyan teret kell tanulmányoznia, amelyben a geometria nem úgy működik, ahogyan várnánk.

Johnson bizarr matematikája és a kozmológusok Einstein-féle egyenlete tulajdonképpen ugyanannak az érmének a két oldala. Ezek a lenyűgöző gondolatok lassan, de biztosan a rögeszmémé váltak. Órákat töltöttem nemeuklideszi geometriai feladatok megoldásával. A matematikának ebben az ágában olyan terek vannak, amelyekben végtelen az olyan egyenesek száma, amelyek egy adott ponton mennek keresztül, és egy adott egyenessel párhuzamosak (Eukleidésznél természetesen csak egy ilyen egyenes van), és ahol a körök területének és átmérőjének aránya nem π . Albert Einstein akkor foglalkozott nemeuklideszi geometriával, amikor egy

olyan matematikai elméletet keresett, amellyel meg lehet magyarázni az általa felfedezett téridőgörbületet.) Újra megoldottam már megoldott differenciálgeometriai problémákat (ezt a fajta geometriát használta Einstein, amikor matematikai alapokra volt szüksége a keletkezőben lévő általános relativitáselmélethez). Végül átnéztem Einstein relativitáselmélettel foglalkozó összes írását.

Miután felfrissítettem a relativitáselmélet megértéséhez szükséges matematikai ismereteimet, felhívtam az egyik régi professzoromat, aki a Berkeleyn tanít, hogy kérdezzek tőle néhány dolgot az általános relativitáselmélet geometriájáról. S. S. Chern valószínűleg a legnagyobb élő géométer. Hosszú telefonbeszélgetést folytattunk, amelynek során türelmesen megválaszolta minden kérdésemet. Amikor elmondtam neki, hogy azt fontolgatom, írok egy könyvet a relativitáselmületről, a kozmológiáról, a geometriáról, és arról, hogy ezek együtt hogyan magyarázzák meg a világegyetemet, azt mondta:

– Ez egy nagyon jó könyvtéma, de a megírása valószínűleg túl sok évedbe telne... én nem tenném – és letette a kagylót.

Elhatároztam, hogy *magamnak* mindenképpen megmagyarázom, mi a pontos kapcsolat a folyamatosan táguló világegyetem, Einstein szellemes általános relativitáselméleti téregyenlete és az általunk lakott világegyetem rejtélyes görbülete között. Úgy éreztem, hogy ha magam számára elfogadható magyarázatot találnék, és kielégíthetném egyre növekvő kíváncsiságomat, utána tudásomat másokkal is megoszthatnám. Minden könyvet elolvastam, amit csak találtam a kozmológia és az általános relativitáselmélet témájában, de ahhoz, hogy ezeket a lenyűgöző gondolatokat valóban megértem, magamnak kellett az egyenleteket levezetnem. Ebben a munkában többen segítettek, mint reméltem.

Alan Guth barátom és szomszédom, az MIT¹ Weisskopf fizikusprofesszora alkotta meg a legígéretesebb elméletet arról, hogy mi történhetett közvetlenül az ősrobbanás (Big Bang) után – ez a felfűvódó világegyetem elmélete. Guth elmélete annyira sikeres, hogy mára szinte az összes világegyetem-modell gerincévé vált. Alan nagyon kedvesen megmutatta nekem a kutatási eredményeit, és órákon keresztül beszélgetett velem kozmológiáról és a téridő különleges geometriájáról. Peter Dourmashkin, aki szintén fizikát tanít az MIT-n, kölcsönadta a kozmológiával kapcsolatos előadási jegyzeteit, és segítségemre volt a bonyolultabb egyenletek kibogozásában. Jeff Weeks matematikus és konzulens segítségével láttam meg az egzakt matematikai kapcsolatot Einstein kozmológiai állandót tartalmazó téregyenlete és a világegyetem lehetséges geometriái között. Colin Adams, a Williams College egyik matematikusa segített a rejtett kapcsolatok mélyére hatolnom, amelyek összekötik a geometriát és a világegyetemet leíró matematikai képleteket. Kip Thorne, a Caltech² világhírű relativitáselmélet-professzora, a fekete lyukak szakértője nagyon kedvesen megválaszolta telefonon feltett kérdéseimet. Paul Steinhardt, a Princeton Egyetem fizikusprofesszora, kozmológiai, fizikai és elméleti matematikai területek úttörője, megosztotta velem meglátásait és elméleteit. Sir Roger Penrose, az oxfordi egyetem nagy hírű matematikusa és kozmológusa készségesen megosztotta velem eredeti gondolatait és elméleteit a világegyetemmel kapcsolatosan.

A szükséges matematikai és fizikai ismeretek birtokában, amikor már láttam, hogy az egyenletek hogyan határozzák meg a geometriát, és Einstein száműzött kozmológiai állandója milyen bámulatosan beleillik a folyamatosan táguló világegyetem képébe, eljött az ideje, hogy a csillagászokhoz

¹ Massachusetts Institute of Technology (Massachusettsi Műszaki Egyetem)

² California Institute of Technology (Kaliforniai Műszaki Egyetem)

forduljak, hiszen ők a világegyetem aktuális állapotának hírhozői. Saul Perlmutter, a Lawrence Berkeley Nemzeti Laboratórium munkatársa, a gyorsan táguló világegyetem hírért hozó nemzetközi csillagászcsapat vezetője nem sajnálta tőlem az időt. Saul megosztotta velem egyéni meglátásait a táguló tér fizikai folyamatairól, és elmagyarázta azokat a szellemes módszereket, amelyekkel ő és csapata észlelik és méri a világegyetem tágulását a sok milliárd fényévnnyire lévő robbanó csillagok elektronikus képének segítségével. Később Saul átnézte a jelen könyv kéziratát és értékes javaslatokat tett. Esther M. Hu, a Hawaii Egyetem csillagászati tanszékének vezetője – ők pillantották meg a Keck ikertávcsövek segítségével a világegyetem legtávolabbi objektumát: egy 13 milliárd fényévre lévő galaxist, amelynek fénye olyan halvány volt, és már annyira vörös, hogy csoda, hogy egyáltalán megláthatták – leírta nekem ezt a fantasztikus élményt. Nagyon kedvesen közölt velem több érdekes szakmai részletet is felfedezéséről, többek között azt is, hogy az általa megfigyelt galaxis a fénysebesség 95,6 %-ával távolodik tőlünk. Neta A. Bahcall, a Princeton Egyetem csillagászprofesszora, a világegyetem tömegsűrűségét tanulmányozza a legfejlettebb megfigyelési és elméleti eszközökkel. Megosztotta velem meglepő kutatási eredményeit. Minden kutatás, amelyet Neta és kollégái az elmúlt évtizedben folytattak, arra mutat, hogy világegyetemünk tömege igen kevés – körülbelül 20 százaléka annak a minimális tömegnek, amelyre szükség lenne a világegyetem tágulásának megállításához. Kutatási eredményeik arra utalnak, hogy a világegyetem örökké tágulni fog.

Jay Pasachoff barátom, a Williams College Hopkins Csillagvizsgálójának igazgatója vendégül látott a Massachusetts állambeli Williamstownban egy nyári napon, amikor éppen ennek a könyvnek a megírásával foglalkoztam. Azért szerettem volna beszélni vele, mert akkor már magának

Albert Einsteinnek a munkáját kutattam. Tudtam, hogy Einstein általános relativitáselméletét bizonyítja az 1919-es napfogyatkozáskor a Nap körül tapasztalt csillagfénygörbülés. Jay Pasachoff a világ legnagyobb szaktekintélye a napfogyatkozások tekintetében. Találkozásunk időpontjáig 26 teljes napfogyatkozást figyelt meg – azt hiszem, ez több mint amennyit valaha egy ember megfigyelt bolygónk története során. Azóta Jay még több napfogyatkozást látott. Hatalmas dossziékat kaptam tőle, tele eredeti dokumentumokkal és cikkekkel. Később még egy cikket adott nekem. A cikk azokról a levelekről szólt, amelyeket Albert Einstein húsz év alatt írt egy viszonylag ismeretlen német csillagásznak. A leveleket éppen akkor adományozta egy magángyűjtő a manhattani Pierpont Morgan könyvtárnak. Több olyan is volt köztük, amelyet még soha nem tanulmányoztak, sőt le sem fordítottak. Ekkor már tudtam, hogy itt valami érdekes fog kiderülni.

A Pierpont Morgan könyvtárban Sylvie Merian és Inge Dupont segítettek nekem, amikor órákon keresztül tanulmányoztam a könyvtár archívumában a leveleket, amelyeket Einstein írt Erwin Freundlich csillagásznak. Megkaptam tőlük a gyűjteményben található 25 Einstein-levél hivatalos másolatát. Köszönöm Charles Hadlocknak, hogy megszervezte nekem ezt a könyvtári látogatást.

Édesapám, E. L. Aczel kapitány velünk töltötte a nyarat Bostonban. Ő az Osztrák-Magyar Monarchiában született és nevelkedett, mielőtt 1930-ban elindult, hogy egy hajó kapitánya legyen a Földközi-tengeren, és kiválóan ismeri azt a német nyelvjárást, amelyen Albert Einstein ugyanezekben az években beszélt és írt. Amikor megkérdeztem, hogy rá tudna-e szólni egy kis időt, hogy Einstein leveleit lefordítsa, édesapám szívesen segített. A következő két hónapban sokat dolgoztunk együtt a leveleken. Egy-egy levél fordítása után újra és újra visszatért egy mondatra vagy kifejezésre, hogy eltűnődjön Einstein egy-egy csípősebb megjegyzésén („Az idegei ziláltak,

és a fején nincs egy vékony szelet szalonna se, hogy megvédje.”), vagy azon, hogy mit gondolhatott a fizikus, amikor elhárította fiatal kollégája segítségkérését („Struve szidta önt. Mint mondta, nem végzi el a kiadott feladatokat.”) Apám észrevett minden apró részletet, és felismerte azokat az árnyalatokat, amelyeket csak az időpont és a hely alapos ismeretében lehet. Figyelmes szemén és fülén keresztül egy meglepő, új Einsteint fedeztem fel. Még mindig ott volt az emberiségéről híres, kedves öregember, de már tudtam, hogy nemcsak rendkívüli módon ambiciózus volt, hanem arra is képes, hogy egyes embereket céljai elérésére használjon, majd, amint nem volt már szüksége rájuk, gyorsan megváljon tőlük. A legendás fizikus emberibb alakja rajzolódott ki előttem, azokkal a hibákkal együtt, amelyek mindnyájunkban, megvannak.

Amikor meglátogattam a jeruzsálemi Einstein-archívumot, a Freundlich-Einstein kapcsolat másik oldala is kirajzolódott számomra a Freundlich által Einsteinnek írt levelekből. Hálás vagyok Dina Carternek, aki a Jeruzsálemi Zsidó Nemzeti és Egyetemi Könyvtárban sok fontos levelet és dokumentumot mutatott nekem.

Az Albert Einstein életét és munkásságát kutató emberek szoros nemzetközi közösséget alkotnak még akkor is, ha ennek tagjai Bostontól Zürichen, Jeruzsálemben és Berlinen keresztül Princetonig, a Föld legkülönbözőbb pontjain helyezkednek el. A bostoni egyetemen dolgozó John Stachel, a sokkötetes *Albert Einstein összegyűjtött munkái* alapító szerkesztője hasznos adatokat hozott tudomásomra: megvilágította előttem Einstein felfedezései némelyikének időrendjét. A zürichi ETH-n (ez az a svájci műszaki főiskola, ahol Einstein tanult) dolgozó Hans Künsch barátom segített hozzá, hogy meglátogassam Einstein svájci házáat.

A berlini Max Planck tudománytörténeti intézetben talákoztam két világhírű Albert Einstein-szakértővel. Jürgen

Renn, az intézet igazgatója elhalasztotta balti-tengeri szabadságát, hogy találkozassunk berlini tartózkodásom folyamán. Renn és intézeti kollégái sok felfedezést tettek Albert Einstein munkájával kapcsolatban, például tőlük származik az a meglepő tény is, hogy Einstein már 1912-ben leírta jegyzetfüzetébe gravitációs téregyenletét, méghozzá pontosan az ismert végső formában, de egy általunk ismeretlen ok miatt azután elvetette, majd négyévi kemény munka után ismét felfedezte – egészen más megközelítésből. Jürgen rendelkezésemre bocsátotta intézetének erőforrásait, és azt is megengedte, hogy megnézzek több, még nem publikált felfedezést Einsteintel és munkájával kapcsolatban. A Max Planck Intézet egy másik kutatója, Giuseppe Castagnetti is sokat segített berlini tartózkodásom idején. Hálás vagyok neki a sok megfigyelésért, amelyet megosztott velem Einstein személyiségével és munkájával kapcsolatban. Giuseppe megszervezte azt is, hogy megnézhessem Einstein vidéki házát Caputhban.

Berlinben csalódást okozott, hogy Einstein lakóhelyeit nem jelzi tábla (Wittelsbacherstrasse 13. és Haberlandstrasse 5.). A berlini hatóságok emléktáblát állítanak minden kis kormányhivatalnoknak, költőnek és festőnek, aki akár csak néhány hónapot is töltött a városban – de a valaha élt legnagyobb fizikus sokáig használt lakásait nem jelzik semmivel. Ezen csodálkoztam, és kicsit bosszankodtam is. Azt is megjegyeztem, hogy mindkét cím a volt Nyugat-Berlin területére esik. Abban az épületben, ahol a Porosz Tudományos Akadémia található (az Unter den Linden sugárúton, amely a nemrég még Kelet-Berlinként ismert városrész szívében helyezkedik el), van egy táblácska, amely feltünteti, hogy a legnagyobb fizikus 1914-től 1932-ig az akadémia tagja volt.

Caputhban (ez a falu a volt Kelet-Németország területén helyezkedik el) viszont meglepetés várt rám. Nemcsak Einstein háza van tisztességesen megjelölve, hanem az épületet a nagy

tudós emlékműveként tartják nyilván, és turistacsoportoknak is bemutatják. Itt köszönöm meg Erika Britzkének, a ház gondnokának, hogy nekem külön is megmutatta az épületet, azokat a részeket is, amelyek a turisták számára zárva vannak, és sok mindent elmondott az Einstein családról, és azokról az időkről, amelyeket itt töltöttek.

1998 késő nyarán, miután az e könyvet megalapozó kutatásaim nagyrészt lezárultak, és már úgy éreztem, hogy meg tudom teremteni a kapcsolatot a kozmológiai elméletek, a csillagászati felfedezések és a gravitáció és a téridő fizikája és Einstein személyes kutatói Odüsszeiája között, látogatóm érkezett. Carlo F. Barengi barátom, aki az angliai Newcastle Egyetem fizikusa és matematikusa, jött el hozzánk. Carlo egy kvantumelméleti konferenciára érkezett, amelyet Nyugat-Massachusettsben a berkshire-i hegyekben tartottak, és minden este együtt autóztunk vissza Bostonba. Vezetés közben kozmológiáról és a világegyetem nagy talányáról beszélgettünk. Carlo segítségével még jobb kozmológiai érveket sikerült felvonultatnom a könyvben.

Szeretném kifejezni köszönetemet John Oakes felé is. Ő a kiadó, akinek a támogatását élveztem, és bátorításából erőt merítettem. Köszönöm továbbá a New York-i Four Walls Eight Windows kiadó összes munkatársának: Kathryn Beldennek, Philip Jauchnak és Jill Ellyn Rileynak.

Feleségem, Debra Gross Aczel, aki az MIT-n irodalmat tanít, elolvasta az egész kéziratot és sok javító szándékú javaslatot tett. Hálás vagyok neked, Debra, minden segítségédért, és az összes, a bevezetőben említett kedves embernek lelkesedésükért, felvilágosításaikért és javaslataikért.

1. *Robbanó csillagok*

„Az a legérdekesebb, hogy a mélyfilozófiai kérdésekre fizikai mérésekkel válaszolunk.”

Saul Perlmutter

Saul Perlmutter dolgozószobája a berkeleyi dombok tetején van, így jó kilátás nyílik a San Francisco-öböl felé. Itt ült, és nézte a Golden Gate alá bukó Napot. Nagyszerű látvány volt, amint a Nap egyre pirosabb lett, és a korongot sávonként nyelte el a kékesszürke Csendes-óceán. Tisztában volt vele, hogy a naplemente miért piros, és az ég miért kék – Saul Perlmutter foglalkozására nézve asztrofizikus. Mégis éppen ez – a Földön olyan megszokott, és a dombtetőn álló, tengerparton bámészkodó vagy felhőkarcolók tetőéttermében vacsorázó sok millió ember által naponta élvezett – jelenség készítette töprengésre, mert eszébe jutottak róla a robbanó csillagok, amelyeket a világegyetem távoli részeiben látott.

Saul Perlmutter tíz éven át irányított egy csillagászcsoporthat a Golden Gate-en túli dombokon lévő Lawrence Berkeley Nemzeti Laboratóriumból. A Hawaiiiban, Chilében vagy az űrben elhelyezett legmodernebb távcsövekkel fogták be a távoli galaxisok elektronikus képét, egyszerre akár több ezret is, és összehasonlították a három héttel korábban készült felvételekkel. A csillagászok robbanó csillagokat keresnek ezekben a távoli galaxisokban. A robbanás a galaxis fényképén (az elektronikus képen) egy olyan fényesebb foltként mutatkozik, amely a három héttel korábbi felvételen még nem volt rajta. A tudósok nem a közönséges robbanásokat keresték,

hanem az Ia típusú szupernóvákat, amelyek a világegyetemben valaha megfigyelt leghatalmasabb robbanásokat produkálják.



Rák-köd *T. Credner & S. Kohle, Bonni Egyetem, Calar Alto
Obszervatórium*

Kr. u. 1054-ben egy kínai csillagász leírt egy „vendégcsillagot”, amely egyszer csak megjelent a ma Zeta Tauriként ismert csillag (a Bika csillagkép egyik hosszú szarvának a hegye) közelében. A csillag egy hónapon belül eltűnt, de maradt egy csillagköd, amelyet ma egy közepes távcsővel megfigyelhetünk. Ennek a halvány, felhőszerű objektumnak a jele M1, a neve pedig Rák-köd, az elmosódott alak formája alapján. A Rák-köd egy hatalmas gáz- és porfelhő, amely egy hajdani csillag robbanása után maradt, és amely azóta is terjeszkedik a körülötte lévő űr felé. A csillagköd középpontjában van a csillag összeomlott magja – egy neutroncsillag, amely erős sugárzást bocsát ki az űrbe a másodperc minden töredékében – egy *pulzár*. A

„vendégcsillag” nem is volt csillag. A kínaiak egy olyan távoli csillag robbanásából eredő erős fényjelenséget észleltek, amely a robbanás előtt nem volt látható. Az ilyen robbanás neve *szupernóva*.

A *nova* szó *új*-at jelent, és egy „nóvá”-ról – amely egy láthatatlan csillag hirtelen felfénylése – sokáig azt hitték, hogy az egy új csillag születése. Akkor is hasonló fényjelenségről van szó, amikor egy fehér törpe (egy halott csillag) anyagot vonz egy körülötte keringő égitestről, és olyan szintre fényesedik, hogy rövid ideig láthatóvá válik. Egy szupernóva ennél sokkal fényesebb jelenség, és már tudjuk, hogy egy csillag robbanása okozza. Sajnos azonban nem egy csillag születését, hanem a halálát jelzi. 1987-ben a déli féltéken észleltek egy szupernóvát, és a rengeteg eredmény, amelyet a megfigyeléseikből levontak, sok mindent világossá tesz ezekkel a titokzatos éjszakai égi felvillanásokkal kapcsolatban. A csillagászok az utóbbi három évszázadban több szupernóvát is megfigyeltek, de az 1987-es robbanás volt az első, amelyet szabad szemmel is látni lehetett. Ez egy II-es típusú szupernóva volt.

Amikor egy nagy (a Napnál jóval nagyobb) tömegű csillag már átalakította a benne lévő hidrogént héliummá és a héliumot szénné, és az utóbbi nukleáris reakciók, amelyek miatt egyre fényesebb csillagként égett, már mind befejeződtek, a csillag már nem tud ellenállni a gravitációnak és összeomlik. Amint befelé zsugorodik saját súlya miatt, a csillag látványosan felrobban. Ez a fajta robbanás a II-es típusú szupernóva. Utána a mérettől függően a csillag maradványai egy sűrű holt testet alkotnak, amelynek a neve neutroncsillag (ebben a közönséges protonok és elektronok már nem képesek együtt meglenni, és összeolvadnak neutronná), vagy – nagyobb tömegek esetében – egy úgynevezett fekete lyuk alakul ki, amely a világegyetem legbizarrabb képződménye. Az utóbbi esetben a létrejött

objektum olyan nagy sűrűségű, és gravitációs ereje olyan nagy, hogy még a fény sem jöhet ki belőle.

Saul Perlmutter és csapata szupernóvákat figyelt meg a világegyetem jobb megértése céljából, ezek azonban teljesen másfajtaak voltak. Ezeket a robbanásokat tulajdonképpen szuper-szupernóvának kellene nevezni, a tudósok viszont egyszerűen az „Ia típusú szupernóva” kifejezést használják. Az Ia szupernóva hatszor olyan fényes, mint egy „közönséges”. A sugárzási spektrum látható részén egy ilyen robbanás az űrben megfigyelhető legfényesebb jelenség. Akkor jelenik meg Ia típusú szupernóva, miután egy fehér törpe, a mi Napunkkal egyező típusú csillag halott maradványai elkezdnek anyagot vonzani egy közeli társcsillagról, amely körülötte kering. (A Nap is ilyen fehér törpe lesz egyszer, amikor elégette összes nukleáris fűtőanyagát, ötmilliárd év múlva.) Amikor a bejövő anyaggal együtt a fehér törpe tömege kb. 1,4-szer akkora lesz, mint a Napé, hirtelen egy brutális méretű robbanás történik. Az ilyen típusú szupernóva esetében a felrobbanó fehér törpéből az űrbe kilőtt anyag sebessége elérheti a fénysebesség jól mérhető törtrészét is.

Az Ia típusú szupernóva fényereje majdnem akkora, mint egy teljes galaxisé. A robbanás hatalmas, és olyan jellemzői vannak, amelyek alapján nem lehet semmi mással összetéveszteni. Éppen ezért válhatott az ilyen szupernóvák megkeresése minden olyan csillagász céljává, akik a távoli galaxisok távolságát és távolodási sebességét szeretnék megmérni. A robbanó csillagok világítótoronyként tűnnek ki az égen. Relatív fényességükből, vagyis abból, hogy megfigyelt fényességük hogyan aránylik egy közeli (saját galaxisunkon belüli) robbanáshoz, a csillagászok meg tudják állapítani, hogy milyen messze vannak galaxisaik a Földtől.

A csillagászok képesek megbecsülni a távoli galaxisok távolodási sebességét is, ha megméri a vöröseltolódásukat. Vöröseltolódásnak nevezzük azt a hullámhossz-növekedést,

amely akkor jön létre, amikor egy fénysugár forrása távolodik a megfigyelőtől. Ez a jelenség a Doppler-hatáson alapul, amelyet a mindennapi életből is ismerünk: a hangmagasság csökkenését vehetjük észre például, amikor egy gyorsvonat távolodik tőlünk. A fény esetében is hasonló frekvenciacsökkenést tapasztalunk: a fénysugarak hullámhossza nő, vagyis a spektrum vörös szélé felé tart, amikor a forrás távolodik a megfigyelőtől, és csökken, vagyis a spektrum kék szélé felé közelít, amikor a forrás közelít a megfigyelőhöz. Az, hogy az eltolódás mindig a spektrum vörös szélé felé történik, vagyis a vöröseltolódás, ahogyan a csillagászok nevezik, a világegyetem tágulása miatt következik be. Ezt Edwin Hubble fedezte fel az 1920-as években. Hubble törvénye kimondja, hogy minél távolabb van tőlünk egy galaxis, annál gyorsabban távolodik tőlünk.

1999 tavaszára Perlmutter csapata 80 olyan Ia típusú szupernóváról gyűjtött adatokat, amelyek mind jóval messzebb voltak, mint a Hubble és követői által megfigyelték. Ezek a robbanó csillagok olyan galaxisokban vannak, amelyek fénye körülbelül 7 milliárd év alatt ér el hozzánk. Az ilyen milliárd csillagból álló galaxisokban az Ia típusú szupernóvák körülbelül évszázadonként egyszer fordulnak elő. Akkor hogyan talált a csapat 80 ilyen jelenséget? A kulcs: Perlmutter furfangos keresési technikája.

Még ilyen alacsony előfordulási aránynál is azt mondják a valószínűségi törvények, hogy ha elég sok galaxist figyelünk meg, akkor bármely adott pillanatban találhatunk egy ilyen robbanó fehér törpét. Így ha egyszerre több tízezer galaxist figyeltek meg, mindig találtak 20-40-60 szupernóvát. Nem volt véletlen az sem, hogy három hetet vártak az egyes területek két-két megfigyelése között. Az Ia típusú szupernóva körülbelül 18 napra fénylik fel, és az ezt követő hónap során elhalványul. Az időkésltetés miatt (ez a relativitás különleges elméletének az egyik következménye, mivel a vizsgált

galaxisok körülbelül a fénysebesség felével távolodnak tőlünk) a Földön úgy tapasztaljuk, mintha a szupernóvák fényesedése három hétig tartana. Ezért, ha a csillagászok a távoli galaxisokat háromhetente vizsgálták, nagy valószínűséggel „befoghatták” és tanulmányozhatták azokat a szupernóvákat, amelyek a két elektronikus kép elkészülte közötti időben robbantak.

Most viszont, amikor az öbölre nyíló ablakból nézte a lenyugvó Napot és a Golden Gate-en át betóduló ködöt, Perlmutter nem volt elégedett. Valamit nem értett. Amióta az 1920-as években felvetették az ősrobbanás-elméletet a világegyetem tágulásának magyarázatára, sokféle elképzelés született arról, hogy mi és hogyan történt, és sokan meg szeretnék volna jósolni a világegyetem jövőjét. Einstein egyenletei alapján többféle lehetőség van.

Először is, lehet, hogy a világegyetem „zárt”. Ebben az esetben az általános tágulás végül megáll, és a világegyetem összeomlik a benne lévő anyag tömegvonzása miatt. Másodszor, lehet, hogy a világegyetem tágulása lelassul, amíg nyugvó állapotba nem kerül, és úgy marad. A tudósok és a laikusok egyaránt az első forgatókönyvet tartották valószínűbbnek. Filozófiailag van abban valami megnyugtató, hogy bár a Nap körülbelül ötmilliárd év múlva elhal, a nagyon-távol jövőben egy szép napon a világegyetem ismét összeomlik, és lehet, hogy – befejezván ezt a „nagy robbanással születés” – „nagy összeroppanással összeomlás” ciklust – talán jön egy újabb ősrobbanás, amely létrehozhat egy új Földet és talán új életet is.

A lassuló, majd megálló tágulás elmélete a tudósoknak kevésbé tetszett, de azért nem vetették el. Ez akkor fordulhatna elő, ha a világegyetem anyagának tömege ahhoz éppen elég lenne, hogy megállítsa a tágulást, de ahhoz nem, hogy a tömegvonzás mindent újra „összehúzzon”.

Csak néhány tudós volt, aki egy harmadik lehetőség megvalósulásában hitt: abban, hogy a világegyetem tágulása örökké tart. És szinte senki sem hitte az elképzelhetetlent: hogy a világegyetem tágulásának mértéke még gyorsulhat is. Perlmutter mégis ez utóbbi lehetőségen töprengett a begyűjtött adatok alapján. A messzi szupernóvák – galaxisaikkal együtt – a vártnál *lassabban* távolodtak a Földtől. Lassabban, mint a jóval *közelebbi* galaxisok. Ez pedig szerintem csak egy dolgot jelenthetett: a világegyetem tágulási üteme gyorsul.

Ennek a zavarba ejtő felfedezésnek az oka nem nyilvánvaló. A magyarázathoz szükségünk lesz az *idő* fogalmára. Itt most egy egyszerűsített magyarázat következik, amely nem tartalmaz minden egyes részletet. Amikor egy csillagász egy hétmilliárd fényév távolságra lévő galaxist figyel meg, azt az állapotot látja, amelyben az akkor volt, amikor a fény elhagyta, és felénk indult, tehát a hétmilliárd évvel ezelőtti állapotot. Ezért amikor kiszámítjuk sebességét a megfigyelt vöröseltolódás alapján, azt a sebességet kapjuk, amellyel a galaxis *hétmilliárd évvel ezelőtt* száguldott el tőlünk. Hasonlóan, egy egymilliárd fényév távolságra lévő galaxis távolodási sebessége az egymilliárd évvel ezelőtti tágulás sebességét jelenti. Viszont ha a távoli galaxis lassabban távolodik tőlünk, mint egy közeli, akkor hétmilliárd éve a távolodás (a világegyetem tágulása) sebessége kisebb volt, mint egymilliárd évvel ezelőtt³. Más szóval: a világegyetem egyre gyorsabban tágul.

³ A számítás a fent vázoltnál bonyolultabb. Azt a fényt figyeljük meg, amely a galaxist hétmilliárd éve hagyta el. Amikor a fény elhagyta forrását, az azt kibocsátó galaxis körülbelül ötmilliárd fényév távolságra volt tőlünk. Amikor a fény ideér, ugyanez a galaxis körülbelül tizenkétmilliárd fényévre van innen. Az okozza az ellentmondást, hogy a tér folyamatosan tágul. Matematikai szempontból nézve a megfigyelt vöröseltolódás a teljes tértágulás függvénye, amely addig történt, amíg a fény a forrásából a Földre ért (a vöröseltolódás nem csak a fényforrás távolodásának pillanatnyi sebességétől függ).

Perlmutter ezzel az eredménnyel nem tudott mit kezdeni. Azért indította ezt a kutatási tervet évekkel ezelőtt, hogy megmérje, milyen mértékben *lassul* a világegyetem tágulása – nem hitte volna, hogy azt találja, helyett folyamatosan *gyorsul*. Ez a végeredmény alapjaiban rengette meg világképét. És ez volt az a pont, ahol Perlmutter elkezdett gondolkodni az eddig csak élvezett naplementéről. A naplemente vörös, az ég kék – ez Rayleigh „kék ég” (fényszórási) törvénye, amelyet minden elsőéves fizikahallgató álmából felkeltve is idéz. A légkör a fény frekvenciájától függően különböző mértékben nyeli el a „fehér fény” tartományát. A vörös fénynek kisebb a frekvenciája és nagyobb a hullámhossza, ezért könnyebben jut át a poron és más levegőrészecskéken, mint a kék. Mivel Perlmutter egy alapos tudós, felvetődött benne, hogy esetleg az adatokban van a hiba. Úgy gondolta, hogy különösen óvatosan kell bánnia az adatokkal egy olyan tudósna, aki olyan megállapítás küszöbén van, amely alapjaiban változtatja meg képünket a világegyetemről – lehet, hogy ez lesz a legfontosabb csillagászati felfedezés Hubble hetven évvel ezelőtti eredményei óta.

Saul Perlmuttert az a kellemes meglepetés várta, hogy az adatai különlegesen pontosnak bizonyultak. Tulajdonképpen abban reménykedett, hogy a szokásos megfigyelési hibák miatt az adatok rosszak. Ilyen hibát okozhatott volna például, hogy a csapata által megfigyelt távoli galaxisokban valamennyi pornak kellett lennie, olyan pornak, mint a mi Tejútunkban. A porrészecskék miatt a megfigyelt réges-régi robbanó csillagoknak olyan vörösnek kellett volna lenniük, mint a naplemente – a szupernóvák mégis az egész látható optikai spektrumban fényesek voltak (nem számítva a vöröseltolódást, amely miatt a csillagok spektrumában minden vonal egyformán tolódik el). Ebből tehát Perlmutter arra következtethetett, hogy nem sok por lehet a földi megfigyelők és a robbanó csillagok között, ezért a megfigyelések minősége kimagasló. El kellett

hinnie tehát, ami az adatokból következik: a világegyetem egyre gyorsabban tágul. Ebből viszont egy ijesztő következtetést kell levonni: világegyetemünk végtelen.

– Képzeld el egy háromdimenziós rácsot – mondta nekem Perlmutter nem sokkal az után, hogy bejelentette csoportja rendkívüli felfedezését. – Minden rácspont egy galaxis. Képzeld el ezután, hogy a rács növekszik. A mi rácspontunk, vagyis galaxisunk távolsága a többi rácsponttól folyamatosan nő. A növekvés üteme, vagyis hogy milyen sebességgel jön létre újabb űr minden két szomszédos rácspont között, növekszik. Mivel egyre gyorsabban keletkezik új űr, semmi nem állítja meg ezt a folyamatot, tehát a tér örökre tágulni fog. világegyetemünk a végtelenségig tágulni fog. Egymilliárd év múlva a távolság köztünk és a távoli galaxisok között sokkal nagyobb lesz, még egymilliárd év múlva még nagyobb, és így tovább, örökre.⁴

Úgy tűnt tehát, hogy az adatokkal minden rendben van, és a következtetés egyértelmű. Elérkezett az idő, hogy megosszák a felfedezést az emberiséggel. Ez meg is történt 1998 januárjában, az Amerikai Csillagászati Egyesület találkozóján.⁵ A világ megdöbbsen. Az emberek nem várták, hogy a világegyetem végtelennek és egyre gyorsabban tágulónak bizonyul. Volt sok olyan tudós is, aki titokban abban

⁴ A fenti szabály alól vannak helyi kivételek. A szomszédos galaxisoknak lehetnek olyan útjaik, amelyeken közelíteni tudnak egymáshoz a teljes világegyetem globális tágulása ellenére. Így például az Andromeda-galaxis, amely a legközelebbi szomszédunk tőlünk 2,2 millió fényévre (ha nem számítjuk a Kis és Nagy Magellán-felhőt, amely inkább a Tejút nyúlványa) egy olyan úton halad a Tejúthoz képest, hogy körülbelül egymilliárd év múlva össze fog ütközni a mi galaxisunkkal. A csillagászok találtak olyan „galaxisfolyókat”, amelyek a világegyetem általános tágulásával ellenkező irányban haladnak.

⁵ Volt egy „rivális” csillagászcsapat, akik saját, kisebb adathalmazukat szintén Perlmutter szellemes módszerével elemezték, és két hónap múlva hasonló eredményt jelentettek be.

reménykedett, hogy a világegyetem megújítja önmagát, és tágulási és összeomlási éonok váltják majd egymást, mintha egy kozmikus kertben váltanák egymást az évszakok. Az új kutatások tükrében viszont úgy látszik, hogy a világegyetem addig tágul, amíg végül teljesen eltűnik.⁶ A csillagok végigélik kiszabott életüket, majd szupernóvaként felrobbannak vagy csillagköd-ként megszabadulnak légkörüktől. Galaxisunkban az új csillagok a halott csillagok maradványaiból születnek. És a haldokló csillagokban létrejövő változatos kémiai elemek tették lehetővé az élet kialakulását. De ha a tágulás tovább folytatódik, és ezért a világűr sűrűsége tovább csökken, akkor végül, évbiliók múlva a világegyetem csillagközi temetővé válna, tele neutroncsillagokkal és fekete lyukakkal.

A tudósok számára a legizgalmasabb kérdés ezek után a „Miért?” volt. Mi a magyarázata ennek a rendkívüli vizsgálati eredménynek? Jó válasznak tűnik, hogy van még egy titokzatos erő a világegyetemben – olyan valami, amit eddig még közvetlenül senki nem észlelt. Ez a valami, amit a fizikusok negatív nyomásnak vagy vákuumenergiának, vagy egyszerűen csak „fura energiának” neveznek, ellensúlyozza a tömegvonzás erejét. Van valami, ami egymástól eltávolítja a galaxisokat, és még fel is gyorsítja ezt a mozgást.

Az 1998. januári találkozón, ahol Perlmutter bejelentette csapata meglepő felfedezését, más tudósok is olyan eredményekről számoltak be, amelyek, bár másféle vizsgálati módszerek végeredményei, ugyanarra a zavarba ejtő végkövetkeztetésre vezetnek. A Princetoni Egyetem két tudósa, Neta Bahcall és Xiaohui Fan a Földtől sokmilliárd fényév távolságra lévő nagy tömegű galaxiscsoportok tanulmányozása során szintén arra az eredményre jutottak, hogy a világegyetem folyamatosan tágul. Neta Bahcall és kollégái három különböző

⁶ Az általános relativitáselméletből nem következik, hogy az ősrobbanást egy általános összeomlás követi. A kvantumjelenségek viszont ezt lehetővé tennék, ha egy világegyetem összeomlik.

technikával tanulmányozták a galaxiscsoportok tömegsűrűségét, és ennek alapján azt állítják, hogy egy pehelysúlyú világegyetemben élünk. Kutatásaik egymástól függetlenül bebizonyították, hogy a világegyetem sűrűsége csak körülbelül 20%-a annak a tömegsűrűségnek, amelyre szükség lenne egy olyan összeomlás előidézéséhez, amely végül egy új ősrobbanáshoz vezetne.

Erick Guerra és Ruth Daly, akik szintén a Princetoni Egyetemen tevékenykednek, hasonló eredményeket kaptak tizennégy rádiógalaxis vizsgálata után. Elemzésük megint csak azt mutatta, hogy a világegyetem tömege valószínűleg kisebb annál, ami meg tudná állítani a tágulást valamikor a távoli jövőben. A találkozón bemutatott összes eredmény egy olyan régi tudományos fogalom kísértetét élesztette fel, amely már bekerült a történelem süllyesztőjébe.

A kozmológusok és a csillagászok egy sürgős találkozót hívtak össze, hogy megvitassák az új eredményeket. A megbeszélésre a Chicagóhoz közeli Fermilabban került sor, 1998. május 4-én. A szervező Paul Steinhardt volt, egy tehetséges fiatal kozmológus (most a Princetoni Egyetemen dolgozik). A világ minden tájáról Chicagóba gyűlt a sok összezavarodott tudós, hogy beszélgessenek a világegyetem tágulásának gyorsulásáról, és arról, hogyan lehet, hogy a világegyetem tömege túl kicsi. Olyan egyenleteket kellene találni, amelyek megmagyarázzák az új adatokat... Einstein gravitációs téregyenlete természetes eszközként adódott e célra a tudósoknak. De ez sem magyarázta meg a tágulás gyorsulását – hacsak egy régi fogalmat, amelyet az egyenlet felfedezője már rég kiselejtezett, és amely ránk, mint „Einstein legnagyobb baklövése” maradt, vissza nem veszünk Einstein egyenletébe. A kozmológiai állandó visszatért.

2. *A korai Einstein*

„Raffiniert ist der Herr Gott, aber boshaft ist er nicht.”⁷

Albert Einstein

A kozmológiai állandó Einstein gravitációs téregyenletének egyik eleme, amelyet Einstein később elhagyott. A téregyenlet volt Einstein munkásságának koronaékszere, a huszadik század második évtizedében kidolgozott általános relativitáselmélet betetőzése. Olyan erejű egyenlet volt, egy olyan bepillantás a természet rejtőző törvényeibe, amelyet Einstein előtt senki sem sejtett, és amely megdöbbenően sokat elárul a jövőről. Felfedezése óta minden évtizedben valami váratlan felfedezés újra és újra igazolja az egyenlet helyességét. Hogyan volt egyetlen ember képes világegyetemünk titkait ilyen jól megérteni?

Albert Einstein (1879-1955) Ulmban született, a Németország délnyugati részén lévő Svábföldön, 1879. március 14-én. Szülei középosztálybeli zsidók voltak, akiknek az ősei emberemlékezet óta ezen a területen éltek. Albert még

⁷ Ezt a mondást emlegetik – és fordítják félre – legtöbbször a tudomány történetében. Az eredeti német mondat Einsteintől származik, aki akkor mondta, amikor először járt az Egyesült Államokban, 1912-ben, amikor meghallotta azt a később hamisnak bizonyuló hírt, hogy felfedeztek egy nemnulla éteráramlást. Egy ilyen áramlás megkérdőjelezte volna az egész speciális relativitáselmélet érvényességét. Szó szerint fordítva ezt jelenti: „Fortélyos (ravasz, éles eszű) az Úristen, de nem rosszindulatú.” Ezzel szemben általában így fordítják: „Titokzatos az Úristen, de nem rosszindulatú.” Azt hiszem, a szó szerinti fordítás többet árul el Einstein személyes kapcsolatáról Istennel.

csecsemő volt, amikor a család Münchenbe költözött. Apjának, Hermann Einsteinnek (1847-1902) és a családdal együtt élő bátyjának volt ott egy kis vállalkozásuk. Egy elektrokémiai gyárat vezettek. Hermann foglalkozott az üzleti ügyekkel, bátyja pedig a műszaki problémákkal. Albert anyja Pauline (Koch) Einstein volt (1858-1920). Az Einstein család kisebbik gyermeke egy lány volt, Maja.

Albertet már kicsi korában is nagyon érdekelte a körülötte lévő világ. Ötéves korában édesapjától kapott egy iránytűt. A kisfiút elbűvölte ez az eszköz, és izgatta a tény, hogy a tű egy láthatatlan mezőnek engedelmessé mindíg az északi pólus felé mutat. Időskori visszaemlékezéseiben Einstein ezt a gyermekkori esetet a gravitációs mezővel kapcsolatos tanulmányai lehetséges kiindulópontjaként említette. Hattól tizenhárom éves koráig Albert – zenei tehetséggel megáldott édesanyja ösztönzésére – hegedülni tanult. A hét év alatt jól megtanult hegedülni, és élete végéig elő-elővette a hangszer. 1886-tól 1888-ig Albert Einstein egy müncheni elemi iskolába járt. Egy állami vallásügyi rendelkezés miatt a családnak, bár nem igazán gyakorolták a zsidó vallást, ki kellett egészítenie a fiú neveltetését az otthoni zsidó neveléssel. 1888-ban Einstein beiratkozott a müncheni Luitpold Gimnáziumba – az épületet a II. világháború során lebombázták, majd egy másik helyen felépítették, és Albert Einstein Gimnáziumnak nevezték el.

A gimnáziumban kiderült, hogy Einstein nem bízik meg előjáróiban csak mert valaki fölé helyezte őket – a tekintélyvel innentől élete végéig gyűlölte. Amikor később az iskolai éveiről beszélt, Einstein az elemi iskolai tanítókat őrmesterekhez, a gimnáziumi tanárokat hadnagyokhoz hasonlította. A mindent elnyomó porosz tekintélyvel szembeni ellenszenv miatt adta vissza néhány évvel később német állampolgárságát, és folyamodott svájci állampolgárságért. Visszaemlékezéseiben megemlíti, hogy a gimnáziumi módszerek alapja a megfélemlítés, az erőszak és a

tekintélyelv volt. Einstein először a gimnáziumban kérdőjelezte meg a tekintélyelv érvényességét – és nem állt meg itt: elkezdett kételkedni mindenben, amiben az emberek hagyományosan hisznek; egyes életrajzírók szerint ez is hozzájárult tudományos fejlődéséhez. 1891-ben történt még valami, ami az iránytűhöz hasonlóan nagy hatással volt Einsteinre. Egyik, következő évre kijelölt tankönyve az euklideszi geometriáról szólt. Még a vakáció során megkapta a könyvet, és iskolakezdésig el is olvasta – és megrökönyödött, hiszen meg kellett kérdőjeleznie az euklideszi geometria alapelveit. Két évtizeden belül kidolgozott egy forradalmi elméletet, amely azon alapul, hogy a tér, amelyben élünk, nemeuklideszi.

1894-ben Einstein családja Olaszországba költözött. Apja egy új, sikeres vállalkozásba szeretett volna kezdeni, miután a müncheni gyár csődbe jutott. A szülők Maját magukkal vitték, de Albertet egy távoli rokon gondjaira bízták, hogy be tudja fejezni a gimnáziumot. Einstein viszont úgy döntött, hogy otthagyja az iskolát, és csatlakozik családjához Olaszországban. Nem tudta elviselni a gimnázium nyers, zsarnoki fegyelmét, és untatták az ott előtérbe helyezett tantárgyak: a klasszikus görög és latin. Több matematikát és fizikát szeretett volna tanulni; ezek voltak azok a témák, amelyek már kisgyermekként is érdekelték. Hat hónap után Einstein megtalálta a szabadulás útját. Szerzett egy orvosi igazolást arról, hogy idegösszeomlása van, és ezért egy ideig a családjánál kellene tartózkodnia. Úgy tűnt, hogy az iskola is megkönnyebbül távozásától, mert viselkedésével zavarta az intézmény fegyelmét.

Einsteinnek nagyon tetszett Olaszország. Az ott uralkodó kultúra: az életnek értelmet és élvezetet adó dolgok ünneplése éles ellentétben állt az általa megvetett germán renddel. Elbűvölték az Észak-Olaszországban mindenütt látott műalkotások is. Einstein Milánóból indulva átgyalogolt az Appennineken egészen a Földközi-tenger Liguria menti

tengerpartján lévő Genovába. De Hermann üzlete megint megbukott, és vissza kellett rángatnia fiát a földre: le kell érettségiznie, hogy továbbtanulhasson, és el tudja tartani magát. Az ifjú Albert úgy gondolta, hogy kiváló matematikai és fizikai tudása alapján biztosan fel fogják venni az egyetemre az otthagyt középiskola érettségije nélkül is. Csalódnia kellett – kiderült, hogy érettségi nélkül sehová sem veszik fel.

1895-ben Einstein nem felelt meg a Svájci Szövetségi Műszaki Főiskola (ahogyan a német rövidítés alapján ismert: az ETH) felvételi vizsgáján. A vizsgával azért próbálkozott meg, mert azt remélte, így kikerülheti az érettségit. Kiválóan teljesített matematikából, de a többi területen, így a nyelvek, a növénytan és az állattan terén elért teljesítménye alatta maradt az intézet követelményszintjének. Az intézet igazgatójában még így is jó benyomást keltett a fiatalember matematikai tudása, és azt javasolta, hogy iratkozzék be a svájci Aarau város kantoni iskolájába, és érettségizzen ott. Bár Einsteint nem nyugtatta meg ez a megoldás, beiratkozott, de még mindig a német gimnázium nyomasztó emlékének hatása alatt állt, ahol a diákokat olyan érthetetlenül gépiesen kezelik. Kellemesen csalódott, amikor megismerte a teljesen másmilyen svájci iskolát. A katonai fegyelem itt ismeretlen volt, nem úgy mint a német iskolában. Itt módja volt pihenni, jól tanulni és barátokat szerezni. Egyik tanárának a házában lakott, és jóban volt a tanár fiával és lányával, akikkel gyakran kirándult a hegyekbe. Egy évet töltött az aarai iskolában, leérettségizett, jelentkezett az ETH-ra, ahová most már fel is vették. Matematika-fizika tanár szakon kezdte tanulmányait. Lenyűgözte a lehetőség, hogy a természetes világot precíz matematikai kifejezésekkel lehet magyarázni. Számára a fizika annak a tudománya volt, hogy hogyan lehet egy-egy elegáns matematikai egyenlettel megragadni a valóságot.

1896. október 29-én Einstein Zürichbe költözött, és beiratkozott az ETH-ra. Két fontos diáktársa lesz az ETH-n:

későbbi felesége, Mileva Maric, és Marcel Grossmann, egy olyan matematikus, akinek a munkái segítségével Einstein a diploma után néhány évvel ki fogja dolgozni a relativitáselméletet. Másodévbén Einstein találkozni fog még Michele Angelo Bessóval is, akivel életre szóló barátságot köt, és aki szószólója lesz a speciális relativitáselmélet kidolgozásának első lépései során.

Az ETH-n töltött első évben Albert Einstein megváltoztatta tudományos pályafutása célját. Eddig a pontig nagyon érdekelte a matematika, és büszke volt tudására. Az intézetben viszont rájött, hogy inkább a fizika érdekli, és hogy a matematika nem más, mint a fizikai törvények mennyiségi meghatározása. Egy pusztán eszköz arra, hogy tömören le lehessen írni a világegyetem törvényszerűségeit, amelyeket viszont a fizika tudományával fedezhetünk fel. De Einsteinnek nem tetszett, ahogyan a fizikát az ETH-n tanították. A fizikusprofesszorok a régi törvényeket ismertették, és nem esett szó az új eredményekről. Einstein tehát elkezdte azt, amit azután, egész életében folytatni fog: az iskolától független olvasás és tanulás útján ismerkedett a fizikai elméletekkel. Éppen ezért nem nagyon figyelt az előadásokon, és hamarosan sok ellenséget szerzett a fizika tanszéken. A matematikával még rosszabb volt a helyzet. Miután eldöntötte, hogy a matematika csak eszköz, és nem önálló tudomány, Einstein nem sokat törődött a matematikaórán elhangzottakkal. A legrosszabb helyzet Herman Minkowski (1864-1909) óráin állt elő, aki egy híres, litván származású matematikus volt. Minkowskit annyira bosszantotta, hogy a fiatal diák ilyen fölényesen kezeli az ő óráit, hogy később csak „lusta kutya”-ként emlegette a nagy tudóst. Mit tesz a véletlen: amikor Einstein néhány évvel az egyetem után megalkotta a speciális relativitáselméletet, Minkowski volt az, aki egy egészen új matematikai területet dolgozott ki a relativitás fizikájának leírására.

Einstein egyetemi nemtörődömsége az államvizsgánál visszaütött. Ma már minden diploma előtt álló diák tudja, hogy bár fontos órákra járni és jó jegyeket kapni, de az egyetemre járásnak van egy ennél még fontosabb célja: jó ajánlóleveleket kell szerezni a tanszék tagjaitól. Einstein idejében ez még inkább így volt. Alihoz, hogy valaki egyetemi továbbképzésen vegyen részt egy nagy presztízzsel bíró intézményben, ajánlást kellett kapnia egy olyan tanártól, aki mellett az adott hallgató tanársegédként tevékenykedett. Einstein nagyon csalódott, amikor egyik tanára sem vállalkozott arra, hogy együtt dolgozzon vele. Einsteinnek el kellett hagynia az ETH-t, és tanári vagy magántanári állás után kellett néznie. Súlyosbította helyzetét, hogy apja egyre nagyobb pénzügyi nehézségei miatt a család még az alatt sem tudta támogatni, amíg munkát keresett.

Einstein 1900 nyarán kapta meg diplomáját az ETH-n, mivel azonban ott nem tudott tanársegédként elhelyezkedni, valamiféle megélhetést kellett keresnie. A következő néhány évben óraadó tanárként dolgozott több svájci iskolában, de sehol sem véglegesítették.

1902. június 16-án az immár egy éve svájci állampolgár Albert Einstein jó barátja, Marcel Grossmann apjának közbenjárására munkát kapott a berni szabadalmi hivatalban, először csak próbaidőre, de 1904-től véglegesítették is. Műszaki szakértőként ő bírálta el a szabadalmi beadványokat. Az előző két évben két fontos változás történt Albert életében: 1902-ben Milánóban meghalt az édesapja, 1903-ban pedig feleségül vette Milevát. Mileva vele tartott Bernbe, és ott összeházasodtak Einstein anyjának tiltakozása ellenére – aki nem szerette a menyasszonyt.

A svájci szabadalmi hivatal érdekes lehetőségeket nyújtott a fiatal tudós számára. Valószínűleg élvezte a munkáját. Egész életében kedvét lelte a célszerszámokkal való bibelődésben, és annak eldöntésében, vajon ezek alkalmasak-e a kitűzött célra.

Hivatali elfoglaltsága mellett tanulásra és kutatásra is volt ideje. Idősebb korában azt javasolta a fiatal kutatóknak, hogy ha meg akarják őrizni kreativitásukat, jobban teszik, ha olyan „rabszolga-” vagy legalábbis szellemileg nem igénybe vevő munkát végeznek, amely mellett marad idejük a kutatásra, mint ha a hagyományt követve egyetemeken helyezkednek el, ahol tanítaniuk kell, más módon is közre kell működniük az intézmény életében, és a pozícióharcokból is nehezen tudják kivonni magukat.

Einstein ideje nagy részét a svájci szabadalmi hivatalban töltötte, ahol olvasott és kutatásokat végzett. Némely életrajzírójával ellentétben azt kell mondanom, hogy Einstein nagyon is tisztában volt mind kortársainak munkájával, mind a korábbi fizikusok és más tudósok tevékenységével, és több nagy filozófiai művet is olvasott, például Immanuel Kant, Auguste Comte, David Hume és Nietzsche munkáit. A fizikusok közül Galileo Galilei (1564-1642), Ernst Mach (1838-1916) és James Clerk Maxwell (1831-1879) volt rá a legnagyobb hatással. Galilei volt az első, aki a mozgó rendszerek relativitásával foglalkozott, és elméletének fejlődése során Einstein gyakran hivatkozott az ő vonatkoztatási rendszerére. Az osztrák Ernst Mach fizikus alaposan végigelemezte Isaac Newton (1643-1727) mechanikáját. Azt állapította meg róla, hogy mozgási megfigyeléseit több egyszerű alapelv szerint rendszerezte, majd ezekből következtetett a továbbiakra. De Machban felmerült, hogy ezek a következtetések csak akkor helytállóak, ha maguk a Newton által leírt kísérletek is azok. Mach hangsúlyozta, hogy a tudományban takarékosan kell bánni a gondolkodással – például „takarékos” modellekkel kell dolgozni, amelyekben a paraméterek száma a lehető legkisebb. Ez az „Ockham borotvája” elvének matematikai formája, azon elvé, hogy a legegyszerűbb elméletnek van a legnagyobb esélye arra, hogy igaz legyen. A matematikai tudományokban ez azt jelenti, hogy

a lehető legegyszerűbb modellt vagy egyenletet kell választani a természeti jelenségek leírására. Einstein fő művének tulajdonképpen Mach az előfutára, aki kritizálja a teljes mértékben az abszolút tér és idő fogalmára építő Newtont. Azt lehet mondani, hogy Mach tudományfilozófiája relativisztikus; ugyanakkor ő volt az atomelmélet egyik korai tagadója, mivel abban az időben (az 1870-es években) az atomok létezése közvetlen megfigyeléssel nem volt bizonyítható. Mach számára minden tudományos következtetés a fizikai megfigyelésekből eredt. Einsteinnek nagyon tetszett Mach ragaszkodása az empirikumhoz, és saját fizikáját ő is relatív és precíz módon építette fel, Newton elméletét csupán a relativitáselmélet határhelyzeteként hagyta meg azokra az esetekre, amikor a sebességek a mindennapi élet tartományában vannak.

Einstein munkáját leginkább James Clerk Maxwell skót fizikus befolyásolta. Maxwell hívta életre az *erőtér* (*mező vagy tér*) fogalmát, amely Albert Einstein munkájának egyik alapfogalma. Maxwell elmélete az elektromágneses jelenségeket egy erőteret leíró egyenletrendszerrel magyarázta – gondoljunk például a vasreszelékek által rajzolt vonalakra, ha a papír alá, amelyre szórtuk őket, mágneset teszünk. A vasreszelék határozott mintát rajzol a két mágneses pólus közé. Az így láthatóvá vált vonalak a mágnes által keltett mágneses erőter képe. Maxwell munkássága nyomán a tudomány könnyebben elbánhatott az olyan fiktív fogalmakkal mint például az éter: így nevezték azt a láthatatlan közeget, amelyen keresztül a fény az űrben utazik. Maxwellt lehetne Einstein előfutárának tekinteni a relativitáselmélet terén, amelynek alapelemei az erőterek. Más tudósok is hozzájárultak Einstein egyre gyarapodó tudásához, amelynek segítségével azután, még a svájci szabadalmi hivatal alkalmazottjaként, kidolgozta a speciális relativitáselméletet. Ilyen tudós volt például Heinrich Hertz (1857-1894), a holland Hendrik Lorentz (1853-1928), akinek a transzformációkról szóló elmélete elengedhetetlen a

speciális relativitáselmélet matematikájának megértéséhez, a nagy francia matematikus: Henri Poincaré (1854-1912) és még sokan mások.

Einstein a speciális relativitáselméletet 1905-ben ismertette, ugyanabban a fantasztikus évben, amikor három másik nagy jelentőségű felfedezését is. Ez utóbbi dolgozatok a Brown-féle mozgásról, a fénykvantum elméletéről és a molekuláris dimenziókról szólnak – ez a harmadik volt a doktori disszertációja. Einstein relativitással kapcsolatos munkái megváltoztatták a mozgással, térrel és idővel kapcsolatos fogalmainkat. A térszemlélet ettől fogva már nem volt abszolút, hanem egy bizonyos vonatkoztatási rendszer szerint tekintendő. A vonatkoztatási rendszer fogalma nem először került elő a tudomány történetében, hiszen Galilei már három évszázaddal ezelőtt felvetett valami hasonlót. Ő azon gondolkodott el, hogy mi változna egy ugyanolyan magasságról leejtett golyó mozgásában, ha nem a szárazföldön, hanem egy hajó árbocáról engednék el. A második esetben a vonatkoztatási rendszer – a hajó – mozog, míg az elsőben a vonatkoztatási rendszer – a szárazföld – nem mozog. Mi történik a golyóval? – kérdi Galilei. Egyenesen esik a hajó fedélzetére, vagy egy visszafelé irányuló utat jár be, mintha a földön ejtették volna le? Einstein továbbfejlesztette a mozgó vonatkoztatási rendszerek ötletét egy eddig fel nem fedezett területre: olyan tárgyakat vizsgált, amelyek a fény sebességéhez közeli gyorsasággal mozognak.

Einstein új, relativisztikus világában csak egy dolog volt abszolút: a fény sebessége. Minden más ezzel függ össze. A tér és az idő téridővé egyesül. Egy gyors űrhajó utasa lassabban öregszik, mint a Földön maradó ikertestvére. A mozgó tárgyak megváltoznak, és az idő kitágul, amikor egy test sebessége megközelíti a fénysebességet. Az idő lelassul. Ha valami a félynél gyorsabban haladna – ez a relativitáselmélet szerint nem lehetséges – az a múltba kerülne. A tér és az idő már nem

szilárd, hanem képlékeny; attól függnék, hogy az adott tárgy mennyire közelíti meg a fénysebességet.



Albert Einstein 1921 novemberében
*AIP Emilio Segrè archívuma, Segrè-
gyűjtemény*

Az idő abszolút és egyetemes mivolta mindeddig a fizika szent és megkérdőjelezhetetlen tantétele volt. Az idő mindenütt ugyanolyan, haladása egyenletes. Einstein megmutatta, hogy ez csak egy feltételezés, ami történetesen nem igaz. Az egyetlen állandó mennyiség a fény sebessége, és minden más, például a tér és az idő ehhez az egyetemes állandóhoz igazodik. Einstein speciális relativitáselmélete megvilágította a történelem egyik legérthetetlenebb kísérleti kudarcát: A Michelson-Morley-féle éterkeresést.

James Clerk Maxwell, akinek olyan sokat köszönhetünk mai fizikatudásunk terén, és akinek az elmélete Einsteint ösztönözte, nem különbözött a relativitáselmélet előtti világ tudósaitól, hiszen szintén hitt az éterelméletben, amely még az ókori görögöktől származik. Az *Encyclopedia Britannica* 1878-as kiadásának egyik címszavához ezt írta: „Minden tér háromszorosan vagy négyszeresen telített éterrel.” De mi is ez az éter? Az általános felfogás szerint a fénynek és más sugárzó részecskéknél szükségük van valamiféle mozgási közegre. Ilyen közeget nem látott vagy érzékelt senki, de akkor is léteznie kell. Ez a feltételezés annyira átható volt, hogy a legtisztéletreméltóbb tudósok is komolyan vették. Egyikük, a neves amerikai fizikus, Albert A. Michelson (1852-1931) egy berlini laboratóriumban dolgozott, amikor megtalálta Maxwell egy 1879-ben írt levelét, amelyben az utóbbi arról érdeklődött, hogy vajon lehetséges-e a Naprendszer éterhez viszonyított sebességét csillagászati módszerekkel mérni. Michelsont mint a fénysebesség mérésének szakértőjét, érdekelte ez a kérdés. Nekilátott egy növekvő pontosságú kísérletsorozatnak, amely azt vizsgálta, hogy észlelni lehet-e a fénysebesség változásait – ez egy éteráramlás jelenlétére mutatna. A munka legnagyobb részében részt vett Edward W. Morley (1838-1923) amerikai vegyész is. A kísérlet 1886-ban történt, miután Michelson visszatért az Egyesült Államokba. Michelson és Morley a fénysebességet vizsgálták a Föld forgásának irányában, és ellenkező irányban is – azt várták, hogy két eltérő eredményt kapnak. De nem így történt. Nem tapasztaltak éteráramlást, sőt étert sem. Michelson volt az első amerikai, aki Nobel-díjat kapott 1907-ben. Addigra Einstein speciális relativitáselmélete miatt már az is világossá vált, hogy mi okozta Michelson és Morley váratlan kísérleti eredményét.

Nem tudjuk, hogy Einstein mikor szerzett tudomást a Michelson-Morley kísérletről, amely mindenki meglepetésére azt bizonyítja, hogy a fénysebesség nem változik a Föld

forgásának függvényében. Einstein csak elméleti megfontolások („gondolati kísérletek”) alapján jutott arra az eredményre, hogy a fény sebessége állandó, függetlenül attól, hogy milyen gyorsan távolodik vagy közeledik a fényforrás a megfigyelőhöz. Albrecht Fölsing, Einstein életrajzírója ír arról az 1905. május közepi napról, amikor Einstein felfedezte a speciális relativitáselmélet alapelvét a berni szabadalmi hivatalban.⁸ Gyönyörű nap volt, amelyről Einstein 1922-ben megemlékezett egy kiotói előadásán. Előtte órákon keresztül tárgyaltak Angelo Besso barátjával a tér és az idő problémájáról, és akkor hirtelen rájött a megoldásra. Másnap Einstein köszönés nélkül berontott barátjához, és előadta a relativitáselmélet alapelvének magyarázatát: „Köszönöm! Teljesen megoldottam a problémát. Megoldásom: az idő fogalmának elemzése. Az idő nem lehet tökéletesen meghatározott, és az idő és a jelsebesség elválaszthatatlan viszonyban vannak egymással.” Einstein megmagyarázta Bessónak az egyidejűség fogalmát. A relativitáselmélet szerint az idő nem mindenhol ugyanaz. Einstein a berni harangtorony és a szomszéd falu harangtornya példáján magyarázta ezt el. Nem az idő vagy a tér az állandó, hanem a fény sebessége. És a speciális relativitáselmélet mindent megmagyaráz. De mi lenne, ha mégis létezne éteráramlás? Amikor Einstein az erre irányuló kísérletről hallott évekkel később, 1922-ben, a relativitáselméletet a világ legnagyobb része már elfogadta. Einstein ekkor tette a ma már híres kijelentést: „Raffiniert ist der Herr Gott, aber boshaft ist er nicht.” Ezt a mondatot a Princetoni Egyetem matematika tanszéke társalgójának kandallója fölött, kőbe vésve olvashatjuk – mindig emlékeztetni fog a speciális relativitáselmélet maradandóságára.

⁸ A. Fölsing, *Albert Einstein*, New York, Penguin, 1997. 155. o.

3. *Prága, 1911*

„Ha Einstein elmélete beigazolódik – és én hiszem, hogy így lesz –, ő lesz a huszadik század Kopernikusza.”

*Max Planck*⁹

Einstein ráébredt, hogy a relativitáselmélet – az általa kidolgozott „speciális” relativitáselmélet – egy olyan világban igaz, ahol nincsenek szilárd tárgyak. A tömeggel rendelkező testek és a gravitáció esetére egy másik elméletet kell alkotni. Isaac Newton három évszázaddal ezelőtt kidolgozta a gravitáció elméletét, de a speciális relativitáselmélet felől nézve a dolgokat, Newton elmélete csak egy szűk területen érvényes. Egy olyan világban, ahol a sebességek a fényénél sokkal kisebbek. Tehát két elmélet van, gondolkodott Einstein: a speciális relativitáselmélet és a newtoni gravitáció. Mindkettő alkalmazható a maga sajátos korlátai között: Newton elmélete egy kis sebességű világban megfelel, de kiegészítésekre szorulna egy olyan világegyetemben, ahol a fény, illetve a fénysebesség (az egyetemes határ) szerepelnek. Hasonlóan, a speciális relativitáselmélet alkalmazható, amíg a gravitáció jelentéktelen, de meg kell változtatni, ha az adott világegyetemben nagyobb tömegű testek vannak. Ha a fénysebesség abszolút, és az *idő* maga relatív, akkor Newton axiómái nem igazak olyan feltételek között, amelyekre inkább a speciális relativitáselmélet vonatkozik, tehát amikor a sebességek a fénysebesség felé közelítenek. Einstein azt a

⁹ A prágai tanszéki bizottságnak írt levél, 1910.

következtetést vont le mindebből, hogy azokban az esetekben, amikor az idő relatívvá válik, a mozgó testek törvényei már nem lehetnek a régi newtoni axiómák. A két törvényt: a Newton-féle gravitációs törvényt és Einstein speciális relativitáselméletét össze kellene vonni valamiféleképpen, és ez lenne az *általános* relativitáselmélet: a relativitás és a gravitáció elmélete. De hogyan?

1907-ben, két évvel a speciális relativitáselmélet kidolgozása után, Albert Einstein, a berni szabadalmi hivatal 28 éves műszaki szakértője, második (az előző évben még csak harmadik) fizetési osztályú hivatálnok, figyelmét a gravitáció problémájára irányította.

Albert Einstein valamikor novemberben, az irodai székén ülve azon töprengett, mi minden következik a két évvel korábban kidolgozott speciális relativitáselméletből. 1922-es kyotói előadásán így emlékezett vissza erre a rendkívüli pillanatra: „Egyszer csak eszembe jutott a következő: ha egy ember szabadesésben zuhan, nem érzi saját súlyát. Megdöbbszemtem ennek az egyszerű ténynek a jelentőségétől. Egy új gravitációs elméletet éreztem kibontakozni.” Michele Angelo Bessonak, a szintén a svájci szabadalmi hivatalban dolgozó barátjának a felfedezést „élete legszerencsésebb gondolataként” mondta el. Einstein a relativitáselmélet keretein belül szeretne volna megmagyarázni a gravitációs erőt. Ez végül oda vezetett, hogy kidolgozta az általános relativitáselméletet – azt a relativitáselméletet, amely magában foglalja a gravitációt is.

Négy éven keresztül, 1907-től 1911 júniusáig Einstein furcsa módon nem nyilatkozott a gravitáció kérdéséről. 1911-ben Svájcból Prágába költözött. Nem tudjuk, hogy az eltelt négy évben Einstein foglalkozott-e a gravitáció problémájával. Ezekben az években az abszolút feketetest-sugárzásról és a

kritikus opaleszcenciáról jelentetett meg cikkeket, de vajon közben a fejében járt-e a gravitáció fontos problémája, és ennek a relativitáselmélettel való kapcsolata? A fizikusok világegyetem-szemléletének forradalmasítója, a speciális relativitáselmélet felfedezője, az az ember, aki most már a fizika összes területén alkotott valamit, továbbra sem volt elismert tudományos körökben. Fizetése mindig szerény volt, ezért ki kellett egészítenie, így a berni egyetemen tanított, de ez a munka számára kellemetlen terhet jelentett. Idősebb korában arról panaszkodott, hogy ő, aki gondolatban órákat helyezett a világűr különböző pontjaira, és elképzelte, amint ezek különböző sebességgel haladnak, és ebből arra következtetett, hogy az idő és a tér relatív, nem engedhette meg magának, hogy egy faliórát vegyen.

1910. április 4-én Einstein titokzatoskodó levelet írt anyjának Zürichből, ahol egyetemi docensként tevékenykedett. „Nagyon jó esélyem van arra, hogy meghívnanak egy nagy egyetemre nyilvános rendes tanárnak jóval több fizetésért, mint amit most kapok. Még nem mondhatom meg, hogy melyik ez az egyetem.”¹⁰ Einstein ugyanezt megemlítette néhány kollégájának is, és valóban: még ugyanebben az évben kiderült, hogy a titokzatos intézmény a Prágai Német Egyetem. Így Einstein, aki még serdülőkorában visszaadta német állampolgárságát, hogy svájci lehessen, és aki a speciális relativitáselméletet svájci földön dolgozta ki, most egy német egyetemhez akart csatlakozni, megkezdvén ezzel azt az utat, amely majd vissza fogja vezetni Németországba, és ezen belül is a nem túlságosan szeretett Berlinbe.

A Prágai Német Egyetem története nem mondható szokványosnak, és nagyon jellemző a cseh főváros korabeli, nemzetiségek közötti viszonyaira. Az egyetem Kelet-Európa legrégebbi ilyen intézménye. A tizenkilencedik században mind

¹⁰ Reprint: A. Pais: *Titokzatos az Úristen (Subtle is the Lord)*, New York: Oxford University Press, 1982.

cseh, mind német professzorok tanítottak benne. A két csoport viszont olyannyira nem fért meg egymással, hogy még a tudományos információkat sem osztották meg egymással. 1888-ban az Osztrák-Magyar Monarchia császára úgy döntött, hogy az egyetem váljék ketté, egy német és egy cseh részre. A szakadás még jobban elmérgesítette a viszonyt a két tanári kar között. Einsteint a német rész alkalmazta.

Prága, a Habsburg Birodalom egyik fontos városa, a császárságot kormányzó Bécs-Budapest-Prága háromszög egyik csúcsa, vonzotta Einsteint. Szilárdan elhatározta, hogy odaköltözik, pedig tudta, hogy így távol lesz a tudományos kutatások központjaitól, és az sem tartotta vissza, hogy Zürichben a prágai Károly Ferdinánd Egyetem ajánlatához hasonló fizetést ajánlottak neki. Einstein kedvét a zsidóellenes megnyilatkozások sem vették el, amelyeket a pályázata elbírálásakor tapasztalt. A tanári jelentkezési lapon ki kellett töltenie egy, a jelentkező vallására vonatkozó rovatot, és az egyetem nem fogadta el a „nincs” választ, amellyel először próbálkozott. Ferenc József császár maga írta alá a tanszéki kinevezésekről szóló határozatokat, és nem nevezett ki senkit, aki nem nyilatkozott a vallásáról. Einstein tehát kénytelen volt a rovatot kitölteni, a császár kinevezte, és április 1-jétől az egyetem professzora lett. Valószínűleg ez a vallással kapcsolatos piszkálódás volt az oka annak, hogy Einstein, aki korábban nem mutatott érdeklődést a vallási kérdések iránt, csatlakozott a prágai zsidó közösséghez. Azt is tudjuk, hogy meglátogatta a híres prágai zsidó Ótemetőt, amelyet a tizenötödik században kezdtek használni, és hogy megtekintette a Löwe rabbi (aki Tycho de Brache tizenhatodik századi csillagász barátja volt) sírja fölött omladozó sírkövet.

Barátainak írt leveleiből úgy tűnik, hogy Einstein nem volt boldog Prágában. Gyakran panaszkodott az egyetemet irányító német tisztviselők hivatalnokszellemére és poroszos merevségére. Az is bosszantotta, hogy a hallgatók közel sem

voltak olyan intelligensek és szorgalmasak, mint svájci társaik. Akár szerette Prágát, akár nem, Einstein nyomot hagyott a város társadalmi életében. Peter Demetz a *Prága feketében és aranyban* című könyvében megemlíti azt a kávéházat, ahol Einstein szívesen töltötte szabadidejét.¹¹ Demetz beszámol arról, hogy még a kávéházi élet is ketté volt osztva: a legtöbb helyre vagy csak csehek, vagy csak németek jártak. A Café Slavia Prága egyik látványossága volt akkoriban; híres cseh nyelvészek és írók – köztük Thomas Mann – törzshelye. A liberális újságírók általában a hátsó sarokban gyűltek össze, a haladó katolikusok elől, az utcai fronton. Ezen a divatos helyen lehetett Einsteint látni, amint napos délutánokon németül beszélgetett egyetemi kollégáival, vagy amint egész lapokat írt tele egyenletekkel. Prágában, Kafka, a kávéházi élet és az osztrák és magyar tisztviselők és a jezsuiták közötti szüntelen intrika városában tette meg Einstein azokat a fontos első lépéseket, amelyek végül is az általános relativitáselmélet kidolgozásához vezettek.

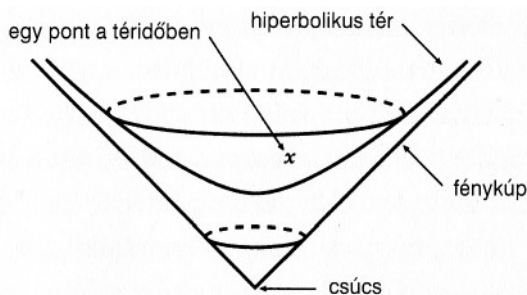
Einstein Prágában először az ekvivalenciaelv fogalmával foglalkozott. Ezt a tételt először Bernben mondta ki, négy évvel korábban. Einstein két vonatkoztatási rendszerrel dolgozott: az egyik nyugalomban van, és benne gravitációs erőter van, a másik egy erőter nélküli rendszer, amely egyenletesen gyorsul. Einstein ekkor írt cikke szerint mindkét rendszerben teljesülniük kell a newtoni axiómáknak, és az ekvivalencia egy új, gravitációs elméletből következik. Ezt kereste tehát – egy olyan elméletet, amely magában foglalná mind a gravitáció, mind a relativitás fogalmát.

Einstein Prágában ezután a gravitációs vöröseltolódásról szóló törvényt alkotta meg. Az ekvivalenciaelvből kiindulva arra a következtetésre jutott, hogy a tömeggel rendelkező testekből eredő fénysugarak frekvenciája csökken, és ezért a

¹¹ Peter Demetz: *Prága feketében és aranyban* (Prague in Black and Gold), New York: Hill and Wang, 1997, 354. o.

spektrum vörös széle felé tolódik el. 1911-ben Einstein már tudta, hogy a speciális relativitáselméletet, amely szerint a fény vöröseltolódását az okozza, hogy a fényforrás távolodik a megfigyelőtől, bele kell foglalnia a gravitáció elméletébe – csak azt nem tudta, hogyan. Ezen a ponton még nem voltak meg azok az eszközei, amelyekkel le tudta volna vezetni, hogy a gravitáció is a sugárzás vöröseltolódását okozza. Azt viszont ki tudta mutatni, hogy az ilyen vöröseltolódás létezik.

Amikor Einstein felfedezte a speciális relativitáselméletet, az ehhez szükséges matematikai eszközök: a Lorentz-transzformáció, és a Minkowski által kidolgozott téridő-matematika a rendelkezésére álltak. Minkowski matematikájában a három különböző irányú térvektor mellé felvett még egy idővektort is. Így egységesen kezelhetővé vált Einstein téridejének négy összetevője, ahol az események és a múlt, a jelen és a jövő közötti kapcsolatok kúpok által jönnek létre a négydimenziós térben. Az ábrán a Minkowski-téridő kétdimenziós megfelelője látható. A fénykúp mutatja a csúcsból induló fény sebességének állandóságát. A kúpon a csúctól való térbeli távolság jelenti az eltelt időt. Az ábra hiperbolája azon pontok mértani helye, amelyeknek a csúctól számított téridő távolságának négyzete megegyezik. A Minkowski-metrika segítségével lehetővé válik a téridő-távolságok mérése.



A Minkowski-téridő

Ennek a matematikának az alkalmazása új volt, de maga a matematika nem túl bonyolult, mivel alapelemeit, a vektorokat már régóta ismerjük. De most, Prágában, amikor Einstein visszatért ahhoz az ötlethez, hogy a gravitáció fogalmát bele kellene foglalni a speciális relativitáselméletbe, rájött, hogy hatékonyabb matematikai eszközökre van szüksége, mint a speciális relativitáselmélethez, és ezeket valószínűleg olyan területen kellene keresnie, amelyhez nem sokat ért.

A gravitáció a teret nemeuklideszivé teszi, ezért Einsteinnek valószínűleg új geometriai eszközökre lesz szüksége a keletkező görbület kezeléséhez. Einsteinnek tehát egy nagyon bonyolult matematikával kellett megbirkóznia. Ezzel megkezdte felfedezőútjának legnehezebb részét, egy olyan erőfeszítést, amelyhez szüksége lesz minden fizikai intuíciójának felsorakoztatására, és azokat párosítania kell egy hatékony matematikai gépezettel.

A következő lépéshez szükséges eszköz az orra előtt volt, de mégis elrejtve – Prágában. Egy tehetséges, de soha el nem ismert matematikus hordozta a megoldás kulcsát. Georg Pick húsz évvel volt idősebb Einsteinnél, és miután az utóbbi csatlakozott a prágai egyetem tanári karához, hamarosan megismerkedtek. Prágában az volt a szokás, hogy az újonnan kinevezett professzorok sorban levizitelték kollégáiknál. Mivel Einstein eddigre már jól ismert szereplője volt a tudományos életnek, a tanszék negyvenvalahány tagja kíváncsian várta látogatását.¹² Einstein először élvezte ezeket a látogatásokat, mivel ezáltal az ismeretlen, szép építészetű és érdekes történelmű város újabb és újabb részeit ismerte meg. Egy idő után azonban elege lett a társalgásból, amely túl sok idejét vette el az általános relativitáselmélettől, és abbahagyta a vizitelt.

¹² Philipp Frank, Einstein legjobb korabeli életrajzírója ezt a történetet, és Einstein életének más különös eseményeit részletesen elmeséli *Einstein: Élete és kora* (*Einstein: His Life and Times*) című könyvében (New York: Knopf, 1957).

Valószínűleg ábécérendben haladt, és a „P” betű után valamikor hagyta abba, mert Georg Picket nem sikerült megsértenie azzal, hogy nem látogatta meg. Összebarátkoztak, és sokat sétáltak együtt, matematikáról beszélgetve. Pick sok történetet tudott Ernst Machról, aki Einstein érkezése előtt az egyetemen tanított, és akinek a gondolatai előkészítették a talajt Einstein speciális relativitáselméletéhez. Pick, Einsteinhez hasonlóan, jól hegedült, és segítségével Einstein csatlakozott egy helyi vonósnégyeshez. Picknek azonban volt egy ennél még fontosabb tulajdonsága: szakértője volt egy olyan matematikai eljárásnak, amelyre Einsteinnek szüksége volt az általános relativitáselmélet kidolgozásához. Pick jól ismerte két olasz matematikus: Gregorio Ricci (1853-1925) és Tullio Levi-Civita (1873-1941) munkáit. Lehet, hogy Pick már 1911-ben megpróbálta Einsteint az említett két tudós matematikája felé terelni, de Einstein egész prágai tartózkodása alatt nem hallgatott a jó tanácsra. Ha Einstein elolvasta volna a két olasz matematikus cikkeit, esetleg többévnnyi kemény munkát takaríthatott volna meg magának.

Einstein harmadik, az általános relativitáselmélettel összefüggő prágai munkája az a törvény volt, amely szerint a szilárd testek nemcsak a szilárd testekre hatnak, hanem a fényre is. Einstein itt dolgozta ki első elképzeléseit arról a törvényről, amely később ekvivalensnek bizonyult Newton évszázadokkal ezelőtti törvényével. Következtetése, amely szerint a fénysugárnak el kell görbülnie egy nagy tömegű test mellett, azonos érvényű volt azzal a newtoni törvénnyel, hogy egy, az űrben haladó test megváltoztatja pályáját egy nagy tömegű test közelében. Ez az az elv, amelynek alapján a NASA úgy tudja módosítani egy űrhajó pályáját, hogy egy bolygó köré engedi kanyarodni. Einstein törvénye megadta a fénysugár elgörbülésének mértékét is, amely akkor következik be, amikor egy nagy tömegű test mellett halad el, feltételezve, hogy a fény nem sugár-, hanem részecsketermészetű. Egy, a Naphoz

hasonló tömegű test esetében, ha a fénysugár éppen súrolná a szélét, az elgörbülés (tehát a szögeltérés) 0,83 ívmásodperc lenne. Einstein valószínűleg számítási hibát követett el, mert a képletből a 0,875 ívmásodperc érték következne. Az utóbbi eredményt négy évvel később, az általános relativitáselmélet teljes kidolgozása után kapta, és amely még mindig csak a fele az eltérés pontos értékének.

Egy idő után, amikor már egy kicsit előbbre haladt, és levezetett néhány törvényt, Einstein úgy gondolta, hogy még ha nincs is elég anyag a kezében egy új elmülethez, akkor is itt az ideje, hogy elméleti következtetéseit kísérletekkel igazolja. A fényelgörbülésről már Svájcban is tudomása volt, de akkor még úgy gondolta, hogy a jelenség annyira jelentéktelen, hogy soha nem lesz mérhető. Elmondta tudóstársainak, hogy az a meggyőződése, hogy a gravitáció hat a fényre, de ez kísérlettel valószínűleg nem bizonyítható. Prágában már máshogyan gondolkozott. Itt már egy konkrét szám volt a kezében (igen, tudjuk, hogy ez a szám nem volt helyes, de legalább egy *nemnulla* fényelgörbülés), és ennek alapján elkezdett azon töprengeni, vajon hogyan tudnák a csillagászok megmérni ezt az értéket. Szerette volna bebizonyítani a kialakulófélben lévő gravitációs elmélet által előre jelzett értékeket. Ha a fényelgörbülés mérhető lenne, ez nagyon kellemesen bizonyítaná elméletét.

Einstein nem tudta, hogy 1801-ben egy német csillagász is felismerte ugyanezt a jelenséget. Johann Georg von Soldner úgy kívánta Newton gravitációs axiómáit a fénysugarakra alkalmazni, mintha azok tömeggel rendelkező testek lennének. Soldner a newtoni szóródási elméletet használta, amely a fényt apró részecskéknek tekinti. Soldner úgy találta, mint Einstein egy évszázaddal később, hogy a Nap felszíne mellett közel elhaladó fény 0,84 ívmásodpercnyire térül ki útjából. Ez fantasztikusan közel van az Einstein által hibásan kiszámított értékhez. Soldner valószínűleg azért tért el a valódi newtoni

0,875 ívmásodperc értéktől, mert nem jól becsülte meg a Nap tömegét. Soldner munkája ismeretlen maradt a fizikusok számára egészen 1921-ig.

Einstein a fényelgörbülésről írt cikkében azt mondta, hogy a jelenségre a csillagászoknak kellene magyarázatot keresniük. 1911 nyarán Leo W. Pollak, a prágai Károly Ferdinánd Egyetem egyik hallgatója berlini útja során meglátogatta a csillagvizsgálót. Ott találkozott Erwin Finlay Freundlichhal (1885-1964), aki akkor a csillagvizsgáló legfiatalabb gyakornoka volt. Freundlich 1885-ben született a német Biebrichben német apától és skót anyától. Miután ledoktorált a göttingeni egyetemen, a berlini csillagvizsgálóban kapott állást. Amikor találkoztak, Pollak megemlítette Freundlichnak, hogy Einstein csalódott, mert a csillagászok nem reagáltak arra a felvetésre, hogy a fényelgörbülést kísérlettel kellene igazolni. Freundlich figyelmét felkeltette, amit Pollak Einstein cikkéről mesélt, és felajánlotta segítségét.

Nem sokkal ezután írt Einsteinnek Prágába, és felajánlotta, hogy megméri a Jupiter bolygó mellett elhaladó csillagfény eltérését, hogy az vajon tényleg jelentkezik-e a bolygó tömegvonzásának hatására. A kísérlet nem sikerült. Einstein szeptember 1-jén levélben köszönte meg Freundlichnak a tett erőfeszítéseket, és sajnálatát fejezte ki, hogy a közelben nincsen a Jupiternél nagyobb bolygó. A negatív eredményű kísérletek ellenére még éveken át folyt a kettejük közötti együttműködés.

Einstein 1912. április 15-től 22-ig egy hetet töltött a Berlini Királyi Csillagvizsgálóban, ahol meglátogatta Freundlichot. 1997-ben a berlini Max Planck Tudománytörténeti Intézetben dolgozó Jürgen Renn megjelentette a *Science* folyóiratban azokat a kutatási eredményeket, amelyekre kollégáival együtt jutott Einstein eddig nem ismert jegyzetfüzete alapján, amelyet a tudós berlini látogatása során használt.¹³ A napi programok feljegyzésein kívül Einstein leírta egy friss, elképesztő

¹³ Renn, J., et al., *Science*, 1997. január 10.

felfedezése: a gravitációs lencse lényegét is. Ez a jelenség akkor lép fel, ha egy távoli csillag vagy galaxis fénye egy másik csillagon vagy galaxison átjutva ér el a megfigyelőhöz. Az Einstein által már ismert fényelgörbülés szimmetrikusan történik, tehát a fénysugarak az égitest körül körkörösen hajlanak el. Ettől a jelenségtől viszont a fény úgy fókuszálódik, mintha egy lencsén haladt volna át. Egy távoli csillag fénye így nagyítható a megfigyelő szempontjából egy „gravitációs lencse” segítségével, amely tehát egy csillag a megfigyelő és a távoli égitest között. Ma a csillagászok akkor használnak gravitációs lencsét, ha nagyon halvány, távoli galaxisokat szeretnének megfigyelni, és ha olyan szerencsájük van, hogy ezek fényének útjába áll egy másik galaxis, és fókuszálja azt. Ezután számítógép segítségével ki lehet bogozni a gravitációs lencséből jövő torzított fényt. Tudjuk, hogy Einstein nem sokat törődött ezzel az 1912-es felfedezéssel, mert úgy gondolta, hogy a jelenség soha nem lesz megfigyelhető.

Rudi W Mandl cseh amatőr csillagász megkérdezte Einsteint, hogy vajon lehetséges-e a fent leírt jelenség. Unsolására Einstein 1936-ban megjelentetett egy cikket a jelenség elméleti levezetéséről a *Science* folyóiratban. Nem tudjuk, vajon egyáltalán emlékezett-e rá, hogy huszonnégy évvel korábban már levezette az elméletet egy jegyzetfüzetben, amelyet Berlinben hagyott. 1936-os feljegyzéseiből úgy tűnik, hogy nem – újra le kellett vezetnie az egészet. A *Science* folyóirat szerkesztőjéhez így írt 1936-ban: „Nemrég meglátogattam R. W Mandl, és megkért, hogy publikáljam egy kis számításom eredményeit, amely számításokat az ő kérésére végeztem. Az ő kívánságára írtam ezt.” És egy személyesebb levélben, James Catte szerkesztőnek: „Hadd köszönjem meg együttműködését a kis cikkel kapcsolatban, amelyet Mr. Mandl erőltetett ki belőlem. Nem ér sokat, de ha ez hiányzik a boldogságához...” 1979-ben észlelték először a csillagászok a gravitációs lencse jelenséget; a felfedezés nagy feltűnést keltett. Ma magát a

jelenséget is tanulmányozzák, és fontos eszközként is használják a világűr mélyén végzendő csillagászati megfigyelések során.

Einstein Prágába érkezése után nem sokkal kapott egy állásajánlatot a zürichi műszaki főiskolától, az ETH-től, ahol korábban tanult: nyilvános rendes tanárnak hívták. Einstein szerette az őt befogadó Svájcot, és így, nem sokkal prágai berendezkedése után, eldöntötte, hogy egy éven belül végleg elhagyja a várost. Lehet, hogy tiszavirágéletű tartózkodása miatt, de a szokásosnál is bátrabban kísérletezett. Erőfeszítéseit most egy olyan témára összpontosította, amelyet csak évek alatt lehetne tökéletesen kidolgozni. Philipp Frank, aki nem sokkal Einstein távozása előtt érkezett a prágai egyetemre, sok élvezetes anekdotát mesélt Einstein prágai, szinte szürreális mennyiségű napi előírt munkaadagjáról. Az egyetemen az Einsteinnak kijelölt iroda egy gyönyörű, szépen ápolt parknak tűnő helyre nézett. A gravitáció problémáján tűnődő Einstein gyakran bámult ki az ablakon, és észrevette, hogy délelőtt csak nők sétálnak, délután pedig csak férfiak. Nem értette, hogy miért, és megkérdezte, mi történik itt. Elmondták neki, hogy ez nem park, hanem egy elmegyógyintézet kertje. Később ő tréfálkozott a kollégáival: azt mondta nekik, hogy ide azokat az örülteket zárják, akik nem hajlandóak kvantumelmélettel foglalkozni. (Einsteinnek egész életében gondja volt a kvantumelmélettel. Egyszer ezt az azóta híressé vált kijelentést tette erről a tudományágról, és ennek probabilisztikus természetéről: „Soha nem fogom elhinni, hogy Isten kockajátékot játszik a világgal.”)

Az általános relativitáselmélet, vagyis az új gravitációs elmélet, nem olyan probléma volt, amelyet Einstein a prágai év alatt meg tudott volna oldani. Még öt évre lesz szüksége az elmélet megalkotásához, nem beszélve arról a tömördek matematikai ismeretről, amelynek ekkor még nem volt

birtokában. Az elmélet kezdetleges alakjából azonban máris két fontos jelenséghez jutott el. Az egyik a vöröseltolódás, amely akkor történik, amikor a fény gravitációs téren halad át. A fénysugár energiája csökken, amikor például egy csillag gravitációs erőtere hat rá. Mivel a fény sebessége állandó – ez a speciális relativitáselmélet alaptétele – a csillag tömegvonzása csak a fény frekvenciáját, illetve az ezzel összefüggő hullámhosszt befolyásolhatja. A frekvencia csökken (azaz kisebb lesz az időegységenkénti fényhullámcsúcsok száma), és nő a hullámhossz. Mivel a nagyobb hullámhossz a spektrum vörös széle felé van, a hullámhossz növekedését vöröseltolódásnak nevezzük. Einstein Prágában elméletileg fedezte fel a gravitációs vöröseltolódás jelenségét. A másik jelenség, amelyre a kibontakozófélben lévő elméletből következtetett, az, hogy a fénysugárnak el kell görbülnie a nagy tömegű testek mellett. Mivel egy olyan nagy tömegű test, amilyen például egy csillag, meghajlítja – nemeuklideszivé teszi – a körülötte lévő teret, ha egy fénysugár halad el egy ilyen nagy tömegű test mellett, el kell, hogy görbüljön, és követnie kell a tér görbületét (az általa számított eltérési szög megegyezett a Newton szerintivel, tehát a valódinak a fele volt). Ezzel a két felfedezéssel a zsebében, és még más fizikai területeken végzett munka után, Einstein készen állt visszatérni Svájcba.

A prágai egyetemi tanárok egyenruhát kaptak. Bár nem voltak kötelesek ebben járni, fel kellett öltetniük, amikor esküt tettek állásuk elfoglalása előtt, illetve, amikor az osztrák-magyar császár jelenlétében voltak. Einstein egész életében irtózott a tekintélyelv minden megnyilatkozásától, és menekült a protokolláris helyzetek és egyéb ceremóniák elől. Nem érezte jól magát az egyetemi egyenruhában, és azzal viccelődött, hogy ha ebben az öltözetben kimenne az utcára, a járókelők brazil tengernagynak néznék. Einstein nagyon örült, hogy megszabadulhat az egyenruhától. Egyetemi utódjának, Philipp

Franknak ajándékozta. Frank viszont csak egyszer viselte, amikor letette a hűségesküt a császár előtt. Frank 1917-ben felesége kérésére Einstein egyenruháját egy orosz volt katonai tisztnek ajándékozta, aki a forradalom elől menekülve Prága utcáin fagyoskodott, mert nem volt pénze kabátra.

Einstein tovább haladt a gravitáció problémájának tanulmányozásában, és megpróbálta azt a speciális relativitáselmélet vonatkoztatási rendszerében elhelyezni, de rá kellett jönnie egy meglepő tényre: a tér nemeuklideszi. Prágai tartózkodásának vége felé – éppen, mielőtt eldöntötte, hogy elfogadja az ETH-től a rendes tanári kinevezést, és visszatér Svájcba – írt egy cikket, amely a következő évben jelent meg az *Annalen der Physik* folyóiratban. A cikkben jelentette be azt a forradalmi következtetést, amelyre a tér és a gravitáció kutatása során jutott: az euklideszi geometria törvényei nem érvényesek egy egyenletesen forgó rendszerben. A speciális relativitáselmélet szerint a kerület zsugorodna, és a tér torzulna. Az egyenesek nem maradnának egyenesek, és a kerület és az átmérő aránya nem lenne π . Mivel a Bernben kidolgozott ekvivalenciaelv szerint egy egyenletesen forgó rendszerben kell lennie egy olyan erőtérfornak, amely megfelel a gravitációs erőtérfornak, Einstein arra a megdöbbenő következtetésre jutott, hogy a nagy tömegű testek közelében a tér nemeuklideszi. De mit is jelentenek az „euklideszi” és a „nemeuklideszi” jelzők?

4. *Az euklideszi probléma*

„A geometriához nincs királyi út”

Alexandriai Eukleidész szavai I. Ptolemaioszhoz,
Egyiptom uralkodójához, Kr. e. 306.

A Perpetua-fok háromszáz méterrel emelkedik a tengerszint fölé Oregon szaggatott partvonalán. A Csendes-óceán partján megtörő magas hullámok tajtékozva zúzódnak szét a lenti göröngyös kis öblökben. A sötétkék óceán fölött kiszögellő Perpetua-fok azért különleges, mert ha valaki a hegyfok tetején áll, látja, hogy a Föld gömbölyű. Akármerre nézzen is, a megfigyelő szeme elé táruló hatalmas óceán szemmel láthatóan lefelé görbül a látóhatárnál. Ha pedig távolodó hajót lát, az olyan, mintha nagyon lassan túlcúszna a Föld kerek peremén, majd fokozatosan eltűnne a hatalmas kék labda mögött.

Ha az ókori babiloniak, egyiptomiak vagy görögök az oregoni partszakaszon éltek volna, lehet, hogy más lenne a matematika és az egzakt tudományok története. De ezek az ókori népek nem éltek a Csendes-óceán partján, és soha nem pillanthatták meg a körülöttünk lévő tér görbületét. A babiloniak és asszír rokonaik a Tigris és Eufrátesz folyók közötti síkságokon éltek, ezért világuk sík volt. A ránk hagyott több ezer agyagtábla tanúsága szerint, amelyre már Kr. e. 4000 óta szorgalmasan jegyezték társadalmuk életének minden mozzanatát, a babiloniak jól értettek a földterületek pontos kiméréséhez. Használták a derékszöget sík termőföldjeik téglalap alakú darabokra osztásához. Ennek a formának a legegyszerűbb a területét kiszámítani: össze kell szorozni az oldalak mérőszámát. Azt is tudták, hogy a derékszögű

háromszög alakú mező területét úgy kapják, ha a befoglaló téglalap területét kettővel osztják. A babiloniak és az asszírok szakértői voltak a síkgeometria ezen területének. Az egyiptomiak is jól értettek a földek kijelöléséhez, megosztásához, és a nyert telkek területének kiszámításához. De ők is sík területen éltek, és nem is volt szükségük arra, hogy megtudják: a Föld felszíne nem sík. Piramisaik is az egyenes vonalú geometria remekművei voltak, három dimenzióban.

A Kr. e. hatodik évszázadban Püthagorasz és követői az általuk alapított dél-olaszországi Crotona falucskában elvont tételeket alkottak a régi egyiptomiak és babiloniak munkái alkalmazásával. A Pitagorasz-tétel tehát a létező világ babilóniai matematikai értelmezésének kiterjesztése. A tétel szerint egy olyan négyzet alakú mező területe, amelynek az egyik oldala egy derékszögű háromszög átfogója, megegyezik a két befogóra illeszkedő négyzet alakú mezők területének összegével. A Pitagorasz-tételnek fontos geometriai következményei vannak, mert segítségével meghatározható az euklideszi tér két pontja közötti legrövidebb távolság! Az egyenes a legrövidebb út. Ha tudjuk a két pont különbségét x irányban és y irányban is, a két pont távolsága a két különbség négyzetének összegéből vont négyzetgyök. Püthagorasz tanítványai ezen az úton továbbhaladva felfedezték, hogy léteznek irracionális számok. Ha a derékszögű háromszög befogóinak hossza 1, az átfogó egy furcsa szám lesz: 2 négyzetgyöke, amely *irracionális*, mert nem írható fel két egész szám hányadosaként. Az ilyen új, számukra nem érthető, és a természetes világban jelentést nem hordozó számok felfedezése Püthagorasz követőit a matematika olyan területeire vitte, amelyeket csak a modern korban dolgoztak ki igazán.

A matematika szépen fejlődött, és két évszázaddal Püthagorasz után Alexandriai Eukleidész megírta *Elemek* című tizenhárom kötetes könyvét, amely mind a mai napig a legnagyobb terjedelmű tankönyv. Az *Elemek* kötetei egy teljes

geometriai elméletet írnak le – és ez az elmélet huszonhárom évszázadon keresztül, napjainkig, a matematikai tanulmányok vezérfonala. Az *euklideszi geometria* egy absztrakciós kísérlet a minket körülvevő tér fogalmainak leírására; axiómák, posztulátumok és tételek írják le az ókoriak által egyedül lehetségesnek tartott tér legfontosabb tulajdonságait.

Eukleidész geometriájának elemei: a pont, az egyenes és a sík – ezeket a fogalmakat minden iskolás ismeri. Eukleidész öt posztulátuma (követelménye; a mai értelmezés szerint: axiómája) a következő: 1. Egyenest lehet rajzolni két pont közé. 2. Folytonos egyenest lehet alkotni. 3. Tetszőleges középponttal és sugárral kört lehet rajzolni. 4. Minden derékszög egyenlő. 5. Ha egy egyenes metsz két másikat, és az egyik oldalon két olyan belső szög keletkezik, amelyek összege kisebb két derékszögnél (180° -nál), akkor a két végtelen egyenes ezen az oldalon metszeni fogja egymást.

Eukleidész első könyvének ezen állításai vagy tételei az egyenesek tulajdonságaival, és a paralelogrammák, háromszögek és négyzetek területével foglalkoznak. Eukleidész az első négy axiómát felhasználta tételei bizonyítására, az ötödiket nem. Hamarosan kiderült, hogy az első négy akkor is érvényben maradna, ha az ötödiket elhagynánk vagy egy másik (az első négynek nem ellentmondó) állításra cserélnénk. Bár az *Elemek* egy olyan népszerű, alapvető könyv lett, amely kétezer éven keresztül hatással volt a nyugati gondolkodásra, a titokzatos ötödik axióma bizonytalan szerepe mindig is foglalkoztatta a matematikusokat. Még megfogalmazása is eltér a többiétől: míg azok tömörek és világosak, az ötödik hosszadalmas. Sokan úgy vélték, hogy az ötödik állítás nem axióma, hanem bizonyítandó tétel.

Az ötödik posztulátumot sokféleképpen át lehet fogalmazni. A Playfair-axióma szerint például egy adott egyenessel csak egyetlen párhuzamos egyenes húzható egy adott ponton át. Egy másik ekvivalens megfogalmazás szerint a háromszög

szögeinek összege mindig 180° , azaz két derékszög. Ez a legkönnyebben elemezhető állítás.

Az *Elemek* legelső megjelenése óta a geometerek kétkedve vélekedtek az ötödik axiómáról: volt, aki feleslegesnek tartotta, volt, aki még az érvényességét is megkérdőjelezte. Az első komoly kétkedő hang éppen azé a tudósé volt, akitől az euklideszi könyvek történetét tudjuk: Proclusról van szó, aki egy V. századi filozófus, matematikus és történész volt (Kr. u. 410-485). Tőle tudjuk, hogy Eukleidész Egyiptom első római uralkodója, I. Ptolemaiosz idejében élt, és hogy maga a király is írt könyvet Eukleidész problematikus ötödik axiómájáról – még azt is bizonyítani vélte művében, hogy az ötödik axióma a másik négyből következik.

Proclus nagyon helyesen azt állítja Eukleidész munkájáról írt könyvében, hogy Ptolemaiosz magában a „bizonyításban” felhasználja azt az állítást, hogy az egyenesen kívül lévő ponton keresztül csak egy párhuzamos egyenes vezet – vagyis az ötödik axióma átfogalmazását. Utána pedig egy saját „bizonyítás” következik, amely szerint az axióma redundáns. Ez a bizonyítás sem jó.

Az ókori Görögország és Európa felébredése között, a középkorban virágzott az arab tudományos élet. Omar Hajjám (kb. 1050-1122), akinek a nyugati világ a költészetét ismerte meg, korának kiemelkedő matematikusa is volt. Írt egy *Algebra* című könyvet. Ebben, és a megelőző évszázadokban más fontos arab és perzsa tudósok is sokat foglalkoztak matematikával: Al-Hvázizmi (IX. század) és Al-Biruni (973-1048) ekkor dolgozta ki az algebra elméletének nagy részét. Omar Hajjám 1123-ban bekövetkezett halála után az arab tudományos élet hanyatlásnak indult. A következő században viszont Maraghában (a mai Irán területén) élt egy különleges tehetséggel megáldott matematikus: Nasziraddin Al-Tuszi (1201-1274). Nasziraddin a legendás hódító Dzsingisz kán unokájának, Kublaj kán testvérének, Hülegü kánnak a csillagásza volt. Nasziraddin

összeállította Eukleidész műveinek arab változatát, és írt egy értekezést az euklideszi axiómákról. Klasszikus és arab matematikus elődeihez hasonlóan neki is gondot okozott Eukleidész ötödik axiómája.

Nasziraddin volt az első tudós, aki rájött a következő, az axiómával ekvivalens állítás jelentőségére: egy háromszög szögeinek összege 180° („két derékszög”). Nasziraddin, elődeihez hasonlóan, megpróbálta bebizonyítani, hogy a nyugtalanító ötödik euklideszi axióma egyszerűen a megelőző négy következménye. Természetesen ez neki sem sikerült.

Eukleidész klasszikus könyvét az arab világban mindenhol sokan tanulmányozták, és ezért – a könyv egyéb témái mellett – sokat vitatkoztak a párhuzamossági axiómáról is, Európában azonban nem. A XII. század elején egy angol utazó, a bathi Adelhard (kb. 1075-1160) Kis-Ázsiából Egyiptomba és Észak-Afrikába vezető útja során megtanult arabul. Ezek után muzulmán diáknak álcázta magát, és átkelt a Gibraltári-szoroson a mór Spanyolországba. Adelhard 1120 körül ért el Córdobába, ahol hozzájutott az *Elemek* egy arab példányához. Titokban latinra fordította a könyvet, és a Pireneusokon keresztül a keresztény Európába csempészte. Így került végre Eukleidész nyugatra, és a könyvet a tudósok és érdeklődők ettől kezdve folyamatosan másolták és terjesztették – és megismerkedtek a geometriával, amelyet a görögök már másfél évezrede kidolgoztak. Az *Elemek* az első, nyomtatásban is megjelent matematikai könyvek egyike volt. A könyv 1482-ben Velencében megjelent változata az Adelhard csempészte arab szöveg latin fordítása volt. Csak 1505-ben, szintén Velencében adta ki Zamberti az eredeti görög szöveg fordítását, amelyet Alexandria-i Theón szerkesztett a IV. században.

Ötszáz év telt el azóta, hogy Nasziraddin az ötödik axiómán töprengett, de ezalatt a nyugati matematika nem sokat haladt előre. A középkor nem kedvezett a matematika, a tudományok, vagy akár az általában vett kultúra kibontakozásának. Egy

folyamatos küzdelmekbe bonyolódott és járványokkal tizedelt világ nem jó hely a tudomány vagy a művészet kibontakozására. 1733-ban viszont Milánóban megjelent egy kis latin nyelvű könyv. Címe: *Euclides ab omni naevo vindicatus* (Eukleidész, minden hibától megszabadítva). Szerzője egy jezsuita pap, Girolamo Saccheri (1667-1733). A könyv a szerző halálának évében jelent meg, de nem ez volt a legnagyobb tragédia, hanem az, hogy ez az úttörő mű, amely alapvetően megváltoztathatta volna a geometriai szemléletet, még több mint száz évig rejtve maradt. Véletlenül fedezték fel 1889-ben, miután az a három ember, aki végleg megváltoztatta a geometriát, és annak értelmezését, már – egymástól függetlenül – mind nyilvánosságra hozta saját felfedezését. A három említett tudós: Bolyai, Gauss és Lobacsevszkij.

Girolamo Saccheri Eukleidész *Eleméit* olaszországi jezsuita kollégiumokban folytatott nyelvtanítására és filozófiai tanulmányai során olvasta. Saccherinek nagyon tetszett Eukleidész logikai bizonyítási módszere, a *reductio ad absurdum*, az indirekt bizonyítás. Ezt a módszert ma is sok matematikus használja. Lényege, hogy feltételezzük a bizonyítani kívánt tétel ellentettjét, és logikai lépések során (remélhetőleg) ellentmondáshoz jutunk. Az ellentmondás viszont a kiinduló állítás hamis voltát bizonyítja – tehát annak tagadása igaz, és éppen ezt szerettük volna bizonyítani.¹⁴

¹⁴ Az indirekt bizonyítási módszerre egy egyszerű algebrai példa annak a tételnek a bizonyítása, hogy a 2 négyzetgyöke irracionális, vagyis nem írható fel két egész szám hányadosaként. Tételezzük fel ennek ellenkezőjét, vagyis azt, hogy *van* két olyan egész szám, a és b , amelyek hányadosa egyenlő 2 négyzetgyökével. Akkor viszont $a^2 = 2b^2$. Az általánosság elvét nem sértve feltételezhetjük, hogy a két egész a lehető legkisebb (nincs olyan [1-nél nagyobb] közös osztójuk, amellyel egyszerűsíteni lehetne a törtet). Ha a páratlan, akkor el is érkeztünk az ellentmondáshoz, hiszen $2b^2$ páros. Ha a páros, akkor egyenlő $2c$ -vel, valamilyen c egész számra. Tehát $a^2 = (2c)^2 = 4c^2$, amely viszont feltételezésünk szerint egyenlő $2b^2$ -tel, tehát b páros, azaz a és b is

Saccheri ismerte Nasziraddin másfél évezreddel korábbi munkáját, ezen belül arról is tudomása volt, hogy az arab tudós megpróbálta Eukleidész ötödik axiómáját levezetni az első négyből. Saccherinek az a ragyogó ötlete támadt, hogy a *reductio ad absurdum* módszert alkalmazza az ötödik axióma bizonyítására. Megpróbálkozott az ősi probléma megoldásával. Ehhez azt kellett feltételeznie, hogy Eukleidész ötödik axiómája nem következik az első négyből, sőt *nem is igaz*. Amikor hozzáfogott a bizonyításhoz, már jól ismerte Eukleidész ötödik axiómáját, és a régebbi bizonyítási kísérleteket, sőt már megmutatta, hogy Naszireddin bizonyítása, valamint egy másik, amelyet az oxfordi John Wallis (1616-1703) készített, hibás.

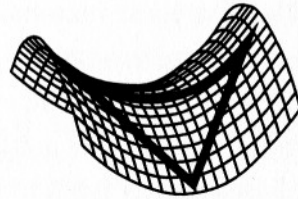
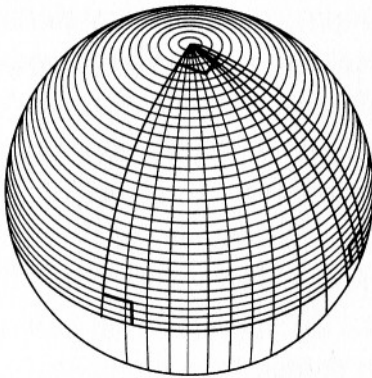
Saccheri feltételezte, hogy az ötödik axióma hamis, és ellentmondáshoz szeretett volna eljutni. Sajnos ez nem sikerült. Saccheri különös végeredményre jutott: egy adott egyenessel egy adott ponton át több párhuzamos is létezik. Ebből háromféle dologra lehet következtetni, amelyeket az ötödik axiómával ekvivalens, a háromszög szögeinek összegéről nyilatkozó tétel mintájára mondott ki. E szerint három különbözőféle rendszer képzelhető el Eukleidész első négy axiómája mellett: egy olyan, ahol a háromszög szögeinek összege két derékszög (euklideszi geometria), egy olyan, ahol a három szög összege kisebb két derékszögnél (azaz kisebb 180° -nál), és egy olyan, ahol a három szög összege nagyobb két derékszögnél (azaz nagyobb 180° -nál). Ma a két utóbbit nemeuklideszi geometriának nevezzük, és tudjuk, hogy ezek konzisztens és matematikailag érvényes rendszerek. Ezek a rendszerek olyanok, mintha más világokra vonatkoznának. Saccheri több fontos eredményt is elért ezekkel az új rendszerekkel kapcsolatban – anélkül, hogy létezésükről tudott volna. Nem ismerte fel, hogy a *reductio ad absurdum* egyszerűen azért nem sikerült, mert ezekben a rendszerekben

osztható 2-vel, amely viszont megint csak ellentmondás.

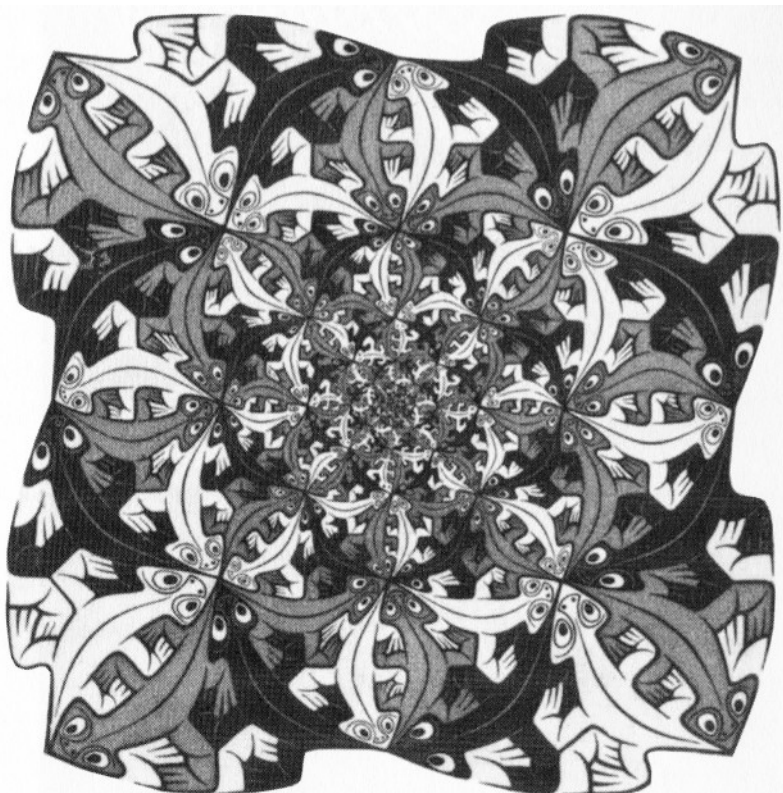
nincs ellentmondás – éppenhogy matematikailag helyesek! Sajnos a matematikusok is csak jóval Saccheri halála után jutottak el eddig a következtetésig.

Eukleidész egész matematikusnemzedékeket kétségbeejtő ötödik axiómája természetesnek veszi, hogy a Föld lapos. Egy ilyen világban az egyenesek valóban egyenesek, és a végtelenbe nyúlnak anélkül, hogy a legkisebb mértékben is elhajolnának.¹⁵ Képzeljünk el egy teljesen sík felületet. Itt egy adott ponton át csak egy olyan egyenes van, amely párhuzamos a pontra nem illeszkedő egyenessel. A párhuzamosok a végtelenbe nyúlnak, és nem metszik egymást. Ezen a sík felületen minden háromszög szögeinek összege 180° . Most képzeljük el, hogy a felületünk gumiból van, egy nagy gömb emelkedik fel alatta, amely felfelé nyomja. A gumifelület meggörbül a gömb hatására, és egy nagy léggömbbé változik. Mi történik a párhuzamos egyenesekkel? Meghajlanak, és a léggömb görbe felületén metszik egymást. Egy gömbön nincsenek egymást nem metsző főkörök. És itt a háromszögek szögeinek összege *nagyobb* 180° -nál. Gondoljunk például egy földgömbön elhelyezkedő olyan háromszögre, amelynek egyik csúcsa az Északi-sarkon, a másik kettő az Egyenlítőn van. Most nézzük meg azt a két hosszúsági kört, amelyeken a háromszög két „szára” fekszik. Ezek mindketten merőlegesek az Egyenlítőre, vagyis 90° -ot zárnak be vele. Így ezen a földgömbháromszögon már két szög összege eléri a 180° -ot. Ha ehhez még hozzáadjuk a két hosszúsági kör által bezárt szöget is, láthatjuk, hogy egy olyan háromszöggel állunk szemben, amelyben a szögek összege nagyobb 180° -nál.

¹⁵ Az egyenesek végtelen mivolta Eukleidész második axiómájából következik. A XIX. század végén G. F. B. Riemann (1826-1866), a nagy német matematikus mutatott rá, hogy az euklideszi vonalakat lehet nem korláatosnak, mégsem végtelennek tekinteni. Egy gömb főköre például tekinthető nem korláatos, de véges vonalnak.



A nemeuklideszi geometria más irányba is fejlődött, mint amit Saccheri előre láthatott. Földünk eredetileg síknak képzelt felületét egy labda felfelé nyomta. Ha Eukleidész a Perpetua-fokon állva megtapasztalhatta volna a Föld gömbölyűségét, és ezt tudatosította volna magában (hiszen lehet, hogy tudta, hogy a Föld gömbölyű, de nem fogta fel a tény jelentőségét), a geometria fejlődése más irányt vehetett volna. De a sík felület másféle deformációja is elképzelhető, például a gömb helyett a felület felvehet egy *hiperbolikus* alakot, ha középen lefelé húzzuk, és *nyeregformát* alakítunk ki belőle. Ezen a felületen végtelenül sok olyan „egyenes” van, amely egy adott egyenessel párhuzamos, és egy rajta kívül eső ponton megy át. Itt vékonyabbak a háromszögek: szögeik összege 180° -nál kisebb.

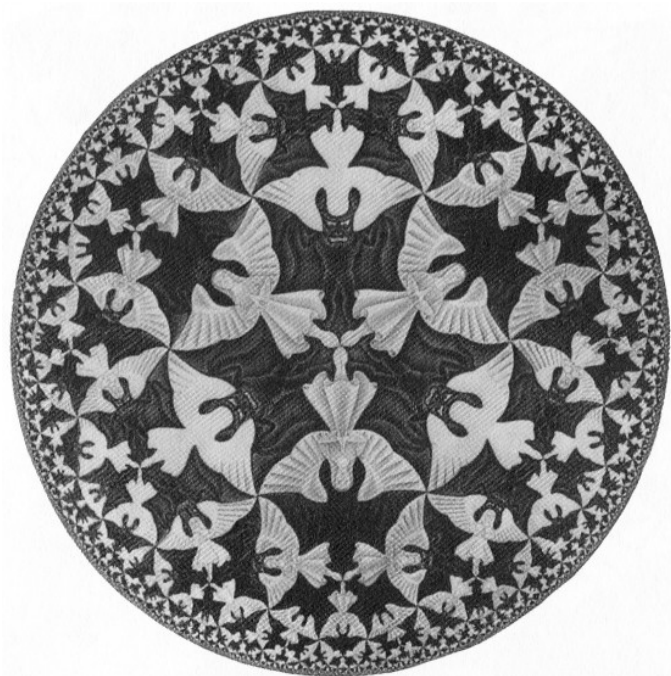


Egyre kisebb: M. C. Escher alkotása¹⁶, ©1999 Cordon Art – Baarn – Hollandia. Minden jog fenntartva.

Tudtán kívül ebbe a furcsa világegyetembe lépett be Saccheri, közvetlenül halála előtt. Mind a gömb, mind a hiperbola esetében az a fontos elem, hogy a sík deformálódott. Képzeljünk el egy sima márványlapú asztalt, amelyen háromszögeket alkotó egyenes fém rudak fekszenek. Valaki tüzet gyújt az asztal alatt. A tűz hőjétől megváltoznak a rudak alkotta háromszögek: a rudak meghajlanak, és a szögek összege többé már nem 180° . Albert Einstein pontosan ezzel a példával

¹⁶ Maurits Cornelis Escher (1898-1972) holland grafikusművész, akinek igen sok fametszete, grafikája szokatlan geometrikus megközelítésű.

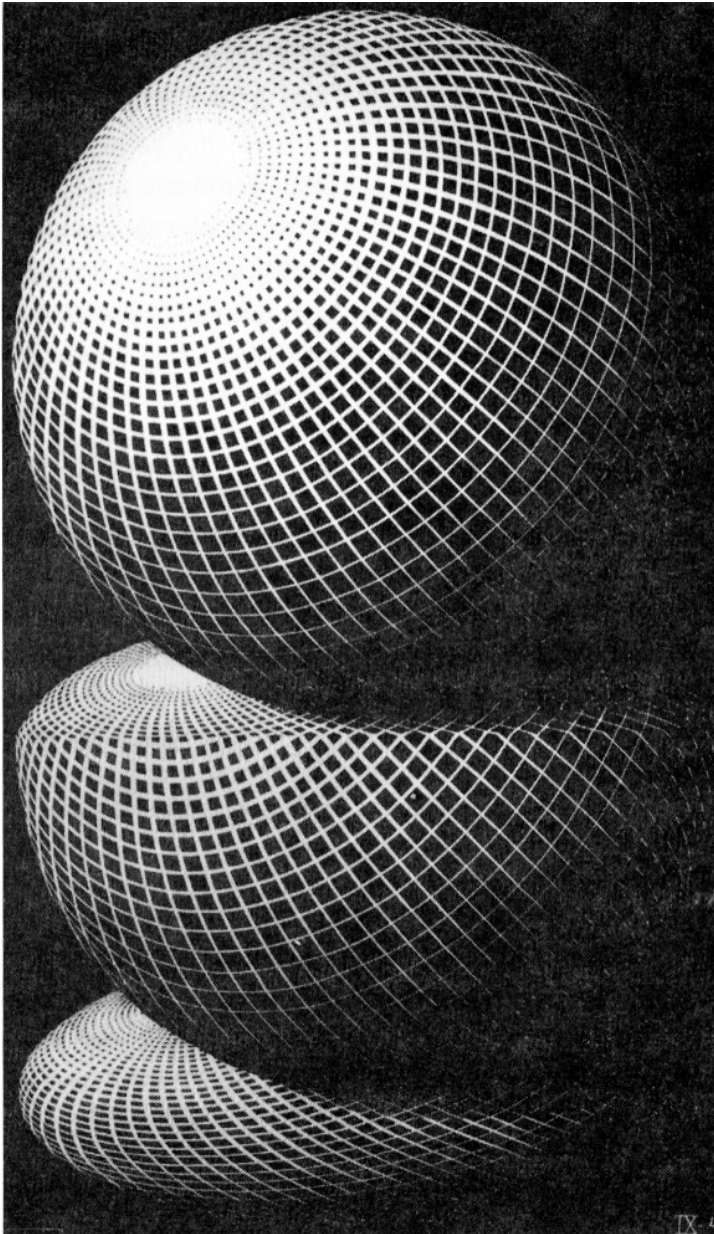
szemléltette két évszázaddal később, hogy hogyan jelenik meg a nemeuklideszi geometria a világunkban.



Menny és pokol

Illusztráció: M. C. Escher, ©1999 Cordon Art – Baarn – Hollandia. Minden jog fenntartva.

A XIX. század elején Carl F. Gauss (1777-1855), a zseniális német, aki bámulatosan sokat tett a tudományok haladásáért, volt a matematika uralkodó alakja. Évtizedeken keresztül töprengett Eukleidész ötödik axiómáján, mégis keveset írt arról a rejtélyről, amelyre annyi időt fordított – sokféle matematikai problémáról írt, de a geometriai elképzeléseit főleg a leveleiből ismerjük. Bár írásos bizonyíték nincs róla, szinte biztos, hogy Gauss tudta: az ötödik axióma tagadása nemeuklideszi geometriákhoz vezet.



Három gömb I: M. C. Escher alkotása, ©1999 Cordon Art
Baarn – Hollandia. Minden jog fenntartva.

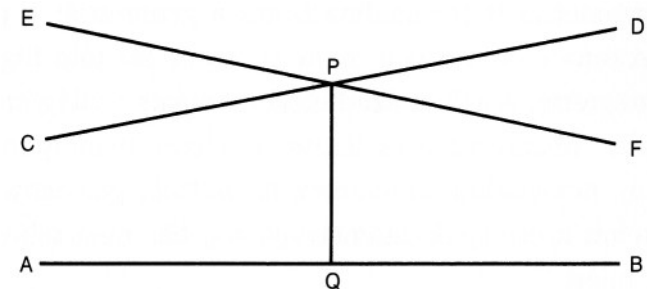
A nagy hírű göttingeni egyetem hallgatójaként Gauss összebarátkozott egy másik matematikushallgatóval, a magyar Bolyai Farkassal (1775-1856). Gauss és Bolyai egyaránt sok időt töltött Eukleidész ötödik axiómájának bizonyításával. 1804-ben Bolyai úgy gondolta, hogy sikerült a bizonyítás, és leírta egy rövid kéziratban, amelyet azután elküldött régi barátjának. Gauss sajnos gyorsan megtalálta a hibát a gondolatmenetben. Bolyai azonban tántoríthatatlan maradt, és néhány évvel később egy újabb bizonyítási kísérletet küldött Gaussnak. Ez is tévesnek bizonyult. Bolyai Farkas mellett, hogy professzor, drámaíró, költő, zeneszerző és feltaláló is volt, egész életében folytatta matematikai kutatásait, a sikertelen kísérletek ellenére. 1802. december 15-én megszületett Farkas fia, Bolyai János (1802-1860). Farkas lelkes levélben számolt be Gaussnak fia születéséről, aki „egy egészséges és gyönyörű gyermek, jó természetű, fekete hajú és szemöldökű, és olyan égő kék szeme van, mint a drágakő.”

János apja matematikatanításán nőtt fel. Örökölte tőle az „ötödik axióma-mániát”, és be szeretne bizonyítani, hogy az az első négy következménye. 1817-ben beiratkozott a bécsi Királyi Hadmérnöki Akadémiára, ahol sok időt töltött apja szenvedélyével: megpróbálta bebizonyítani az ötödik axiómát. Eddigre apja már kétségbeesett levelekben próbálta fiát lebeszélni arról, hogy az idejét annak a lehetetlen problémának a megoldásával töltsse, amellyel ő maga oly sokat vesződött.

A fiú azonban tántoríthatatlan volt. Mindenképpen el szeretne érni a kitűzött célt, talán éppen apja sok évtizedes meddő próbálkozása miatt. 1820-ban Bolyai János megdöbbenő következtetésre jutott. Az ötödik axióma nemcsak hogy nem volt bizonyítható, de egy varázslatos világ kapuját nyitotta meg: „A tér abszolút igaz tudománya” új világát, amelynek Eukleidész geometriája csak egy speciális esete.

Bolyai Eukleidész ötödik axiómájának Playfair-féle átfogalmazásából indult ki: egy adott ponton át csak egy

egyenes húzható egy adott, a pontot nem tartalmazó egyenessel. Bolyai feltételezte, hogy ez a posztulátum nem igaz. Ez viszont azt jelentené, hogy vagy nincsen ilyen párhuzamos egyenes, vagy egynél több ilyen egyenes van. De Eukleidész többi axiómája következtében az egyenesek *végtelenek*. Ez pedig bizonyíthatóan ellentmond az első feltevésnek, tehát Eukleidész ötödik axiómájának egyetlen alternatívája a másodikként említett lehetőség. Ha két egyenes is lenne, amely egy adott ponton megy át, és amely párhuzamos egy adott, a pontot nem tartalmazó egyenessel, akkor végtelen sok ilyen egyenes lenne. Ezt szemlélteti az alábbi ábra.



A CD és EF egyenesek párhuzamosak az AB egyenessel, és áthaladnak a P ponton.

Ebből a következtetésből az ifjú Bolyai elképesztő eredményre jutott. Új geometriája annyira mentes volt az ellentmondásoktól és akadályoktól, mintha maga Isten tervezte volna meg a geometria ezen új, csodálatos, nemeuklideszi útját. Bolyai azt is örömmel vette észre, hogy sok geometriai tétel igaz maradt anélkül, hogy bármit kellett volna állítani a párhuzamosokról, és így alkalmazható maradt mind az euklideszi, mind a nemeuklideszi geometriában. Ezek éppen a tér természetének lényegét leíró tételek voltak. Bolyai, aki 1823-ban csak 21 éves volt, ezt írta apjának: „a semmiből egy ujj, más világot teremtettem”.

Az apa felajánlotta segítségét, és végül fia úttörő munkája saját, *Tentamen*¹⁷ című matematikai könyvének függelékeként jelent meg 1832-ben.

Gauss, amikor elolvasta a két Bolyai könyvét, megjegyezte, hogy ő is hasonló következtetésre jutott, miután három és fél évtizeden át töprengett Eukleidész ötödik axiómáján. És volt egy harmadik matematikus is, aki hasonló végkövetkeztetéseket vont le. Nyikoláj Ivanovics Lobacsevszkij (1793-1856) a kazanyi egyetemen diplomázott 1813-ban. Ez a város 600 versztányira (majdnem 650 km) keletre fekszik Moszkvától, az Urál hegység felé. Később ennek az egyetemnek a tanára, majd 1827-ben a rektora lett. Kérdemelte „a geometria Kopernikusza” címet, mivel az általa kidolgozott Lobacsevszkij-geometria is forradalmasította a geometriát a párhuzamossági axióma elhagyásával, mint ahogyan azt tőle függetlenül Bolyai is megtette. A XIX. század elején, amikor a világ megismerhette Bolyai, Lobacsevszkij és Gauss elméletét, némely matematikusok az új, nemeuklideszi geometriát *asztrális geometriának* nevezték – tehát a csillagok geometriájának, bár nem teljesen világos, hogy miért.¹⁸

A Bolyai-Lobacsevszkij-Gauss-geometriában egy háromszög szögeinek összege nem 180° . És a körök nem a mindennapi (euklideszi) életben megszokott körök: itt a terület és az átmérő aránya nem π .

Einstein követte azt a logikai utat, amely „élete legszerencsésebb gondolatával” kezdődött. Még mindig a

¹⁷ *Tentamen juventutem studiosam elementa matheseos purae, elementaris ac sublimioris methodo intuitiva, evidentiaque huic propria, introducendi.*

¹⁸ 1818-ban Karl Schweikart ezzel a kifejezéssel illette a nemeuklideszi geometriát barátjának, Gerlingnek, aki a marburgi egyetemen csillagászatot tanított, és aki Gauss tanítványa volt.

svájci szabadalmi hivatal alkalmazottjaként lefolytatta egyik híres gondolatkísérletét. Elképzelt egy kört, amely a térben pörög. Középpontja nem mozdul el, de a körvonal gyors forgó mozgást végez. Einstein összehasonlította, hogy mi történne többféle *vonatkoztatási rendszerben*; ezt az eszközt gyakran használta a speciális relativitáselmélet kifejtése során. Arra a következtetésre jutott, hogy a speciális relativitáselmélet alapján a körlap területének a forgás során össze kell húzódnia. Egy erő (a centrifugális erő) hat a kör területére, és ez az erő a gravitációval analógiába hozható. De az összehúzódás csak a kör területére vonatkozott; az átmérő változatlan maradt. Ebből tehát Einsteinnek – a saját legnagyobb megdöbbenésére – arra kellett következtetnie, hogy a kör területének és az átmérőjének aránya nem π . Vagyis gravitációs mező jelenlétében a tér geometriája nemeuklideszi.

5. Grossmann jegyzetei

„Ő jó viszonyban volt a tanárokkal, és mindent értett; engem, a páriát nem sokra becsültek, és nem sokan szerettek.”

*Einstein, Marcel Grossmann özvegyének írt levelében*¹⁹

Einsteinnek, a tudatos, de türelmetlen diáknak szilárd matematikai alapokra volt szüksége forradalmi elméleteihez. Ezeknek az alapoknak nagy részét egy nála jobb magaviseletű diák, Marcel Grossmann jegyzeteiből puskázta ki. Marcel Grossmann (1878-1936) egy generációk óta Svájcban, de akkor éppen Budapesten élő családban született. Tizenöt éves korában visszatért Svájcba, leérettségizett, és 1896 és 1900 között a zürichi ETH-n tanult. Matematikai tanulmányokat folytatott a zürichi egyetemen; szakterülete a geometria volt, ebből doktorált. Később cikket és tankönyveket írt a nemeuklideszi geometriáról.

Einsteinnel diáktársak voltak az ETH-n a századforduló idején. Grossmann nagyon lelkiismeretes volt, minden órán részt vett és aprólékos gonddal jegyzetelt – ő volt minden tanár álomdiákja. Grossmann Minkowski és más matematikusok és fizikusok előadásait hallgatta az ETH-n. Jegyzetei, amelyeket most az ETH archívumában őriznek, döntő fontosságúak lettek Einstein számára, amikor abba a szakaszba érkezett, hogy kidolgozza az általános relativitáselmélethez szükséges matematikai eszközöket. Einstein kulcsegyenlete ezen, és még bonyolultabb matematikai összefüggéseken alapul. Einstein azonban nem csak a matematikáért lehetett hálás Grossmann-

¹⁹ R. W. Clark, Einstein: Élete és kora (Einstein: The Life and Times), New York: Avon, 1972, 62. o.

nak. Az ő apja segítette Einsteint a berni szabadalmi hivatali állásához, amikor az ifjú pályakezdő nem talált munkát. 1905-ben, ugyanabban az évben, amikor Einstein megjelentette első, a speciális relativitáselmélettel foglalkozó cikkét és az $E=mc^2$ egyenletet, beadta doktori disszertációját is a zürichi egyetemen. A tézis: „A molekuláris méretek meghatározásának új módszere”. A munkát barátjának, Marcel Grossmann-nak ajánlotta.

1911 végén Grossmann kereste fel Einsteint Prágában, hogy megtudja, vajon nem szeretne-e visszatérni Svájcba, és elfoglalni egy állást korábbi iskolájában, az ETH-n. Einstein addigra már több ajánlatot is kapott különböző európai egyetemektől, mégis azonnal megörült a lehetőségnek, és sietett elfogadni az ETH ajánlatát, és visszatérni svájci földre. Bár prágai állásának betöltéséhez korábban fel kellett vennie az osztrák-magyar állampolgárságot, megtartotta a svájci is. 1912 elején Einstein visszatért szeretett Svájcába.

Miután rájött, hogy a tér nemeuklideszi, segítségre volt szüksége. Régi barátjához fordult tehát, aki eddigre pontosan annak a területnek vált elismert szakértőjévé, amelyre Einsteinnek szüksége volt. Einstein néhány életrajzírója és a relativitásról szóló egyes könyvek szerzői azt állítják, hogy Einstein nem volt jó matematikus. Ez nagyon távol van az igazságtól. A tudós, akinek a világ a relativitás elméleteit köszönheti, kiváló matematikus volt. A problémát az okozta, hogy fiatalkorában, az ETH hallgatójaként Einsteinnek nem sok kedve volt ahhoz, hogy az előadótermekben ücsörögjön, és matematikai előadásokat hallgasson. Matematikai tudása elegendő volt a speciális relativitáselmélet kigondolásához, és amire később még szüksége volt, azt saját maga könnyedén elsajátította. Jó példa erre kapcsolata Hermann Minkowski matematikussal. Einstein nem vette komolyan Minkowski ETH-n tartott előadásait. Évekkel később, amikor a tudományos körök már elfogadták a speciális

relativitáselméletet, Minkowski írt az abban alkalmazott matematikáról; az ott szereplő négydimenziós teret gyakran emlegetik Minkowski-téridőként. Grossmann, Einsteintel ellentétben komolyan vette matematikai tanulmányait. Jegyzeteinek fontos szerepe volt Einstein általános relativitáselméletének kidolgozásában. Amikor Einstein visszatért az ETH-ra, ráébredt, hogy segítségre van szüksége, méghozzá sürgősen. Ha a tér nemeuklideszi, akkor nagyon jól kellene ismernie annak geometriáját, mielőtt továbbgondolhatná a gravitációval és a relativitással kapcsolatos elméleteit. Ezzel szemben szinte semmit nem tudott a tér geometriáiról.

Grossmann előszedte a századforduló táján készült, már sárguló jegyzeteit, és keresett egy kiindulópontot, amelyből kiindulva Einstein elkezdhetné megalkotni a világegyetem és a gravitációs mező modelljét. A jegyzetek és az azóta végzett geometriai kutatásai alapján Grossmann úgy gondolta, hogy barátjának azokra a sajátos módszerekre lesz szüksége, amelyeket a XIX. század végén dolgozott ki két olasz matematikus: Gregorio Ricci és tehetséges tanítványa, Tullio Levi-Civita. Emlékezhetünk, hogy Georg Pick matematikus még Prágában azt mondta Einsteinnek, hogy ennek a két tudósnek a munkássága közelebb vinné őt elmélete matematikai részének kidolgozásához, de valamilyen okból Einstein akkor nem foglalkozott ezzel a lehetőséggel. Most, amikor Grossmannt kérte meg, hogy vezesse őt a geometria világában, hallgatott a tanácsra.

A nemeuklideszi geometria önmagában nem adta meg a választ Einstein kérdéseire. Az ilyen geometriák a teret az egyenesek, szögek, párhuzamosok, körök stb. szempontjából írják le. Einsteinnek ennél jóval többre volt szüksége. Leginkább az állandóságra. A jó fizikai törvények invariánsak, vagyis nem változnak meg a vonatkoztatási rendszer vagy a mértékegységek megváltozásával. Két órába telik, hogy 120

kilométert megtegyünk 60 km/ó sebességgel, és ez nem szabad, hogy megváltozzon, ha a távolságot mérföldben, a sebességet pedig mérföld/órán mérjük. Einstein olyan matematikai eszközt keresett, amelynek segítségével nem kell foglalkoznia a tér görbülésével (és annak nemeuklideszi természetével), azaz az elmélet változói érvényben maradnak bármilyen térgörbület mellett. Grossmann rendelkezésére bocsátotta jegyzeteit és az általa ismert szakirodalmat, de ez mind nem volt elég Einstein gravitációs problémájának megoldásához.

Miután 1912-ben hónapokat töltött a probléma megoldására tett kísérletekkel, Einstein azt mondta barátjának:

– Grossmann, Du musst mir helfen, sonst werd’ ich verrückt!
(Grossmann, segítened kell, különben megőrülök!)

Grossmann ez után a segélykiáltás után személyesen is közreműködött Einstein munkájában. Több közös cikket írtak a gravitáció problémájáról. Ezek a cikkek jelentették a következő lépést az általános relativitáselmélet felé vezető úton, de még mindig nem sikerült eljutniuk a leírni kívánt bonyolult jelenségek teljes magyarázatához.

Einstein figyelme ekkor fordult a tenzor fogalma felé. Ennek a fogalomnak a segítségével jobban megérthetjük a relativitás (először a speciális, majd a bonyolultabb általános relativitáselmélet) problémái megoldásához szükséges egyre bonyolultabb matematikát. Az egyszerű rendszereket olyan egyenletekkel lehet leírni, amelyeknek az elemei számváltozók. Egy egyenest például az $y = ax + b$ egyenlet ír le. Itt x és y egy-egy szám, a és b pedig együttthatók, amelyeknek értéke szintén egy-egy szám. Ha egy egyenes meredeksége $a = 2$ és az ordinátatengelyt $b = 3$ -ban metszi, akkor adott x szám esetén ki tudjuk számítani y értékét; pl. ha $x = 5$: $y = 2 \times 5 + 3 = 13$. Amikor a feladatok már bonyolultabbak, több egyenletre van szükség, vagy olyan egyenletre, amelyben a változók több számot (szám- n -est) jelölnek. Itt x már vektor, vagyis egy rendezett számsorozat, és ugyanez igaz y -ra és a többi változóra

is. Fizikában a sebesség, a gyorsulás és az erő mind vektorok, hiszen van abszolút értékük és irányuk, és ezért egy-egy számsorozattal írhatók le.

Einsteinnek ezen a ponton a vektor fogalmának általánosítására volt szüksége. Tenzorra: egy olyan változóra, amely a vektor fogalmának kiterjesztésével jön létre. Egy háromdimenziós vektornak három összetevője van. Egy (másodrendű) háromdimenziós tenzornak $3^2 = 9$. A tenzor alkalmas az Einstein által megkövetelt invarianciára, és a változók kezelését is megoldja bonyolult helyzetekben. Az általános relativitáselmélet nagyon bonyolult feladatok elé állította Einsteint: tízféle mennyiséget kellett figyelembe vennie (ezeket $g_{\mu\nu}$ -vel jelölte), amelyek leírták a négydimenziós tér (három a tér, egy az idő miatt) görbületét. A $g_{\mu\nu}$ tenzor neve: *metrikus tenzor*, mivel a távolság mérésére alkalmas az elgörbült térben. De még mindig nem rendelkeztek azokkal a matematikai eszközökkel, amelyek valódi eredményeket adtak volna. Még valamire szükség volt – olyan valamire, ami általánosabb Ricci és Levi-Civita eredményeinél. Einsteinnek meg kellett találnia a módját, hogy hogyan tudja úgy változtatni a metrikus tenzort, hogy az invarianciaelv tartható legyen egyenletei bármely transzformációja esetében – függetlenné kellett válnia a térgörbülettől, akármilyen formában is jelentkezzen az. A Grossmann-nal együtt folytatott munka eredményeképpen csak a lineáris transzformációkat tudták kiküszöbölni, de ez a körülmény nem volt elég általános a kitűzött cél eléréséhez. Erre azonban Einstein csak 1913-ban jött rá.

Nagyon élvezte a zürichi életet. Végre ismerős és szeretett helyen volt családjával együtt. Felesége, Mileva, és két fiuk nagyon szerették Svájcot, és ez is hozzájárult ahhoz, hogy jól érezze itt magát. És Einstein itt barátok között volt. Itt kezdte el kollégáival és hallgatóival megbeszélni a világegyetem problémáit. Einstein kidolgozás alatt lévő gravitációs

egyenleteiből máris le lehetett vonni a világegyetem egészére vonatkozó következtetéseket, és nagy lelkesedéssel vettette bele magát annak felderítésébe, vajon milyen világegyetemben is élünk mi.

Barátai és kollégái elbeszéléséből tudjuk, hogy a gondtalan Einstein előadások után hogyan vonult át diákok gyűrűjében kedvenc kávéházába, a Zürichberg lábánál lévő Terrasse Caféba, ahol azután órákon keresztül vitatták a minket körülvevő hatalmas tér kiterjedéséről, alakjáról, múltjáról és jelenéről szóló elméletek filozófiai következményeit.

1913 tavaszán Einsteinnek két olyan látogatója érkezett, akik ismét megváltoztatták életét, és családjával együtt új költözésre bírták. Max Planck (1858-1947) és Walter Hermann Nernst (1864-1941) volt a két látogató. Max Planck volt korának legnagyobb fizikusa – ő volt a kvantumelmélet kidolgozásának a kulcsfigurája. És, mint később Einstein is beismerte, Planck volt az egyetlen tudós, akire valóban felnézett. Tudjuk, hogy a csodálat és tisztelet kölcsönös volt. Planck és Hermann Nernst fizikusok keményen lobbiztak Berlinben, hogy kicsikarják a berlini egyetem tanszékének meghívását.

Planck és Nernst Zürichben a lakásán találkozott Einsteinnel. Eddigre Einsteinnek már több meghívása is volt, az egyik egy egyetemi tanári állás a hollandiai Leidenben. A két német tudós nagyon szeretne volna, ha Einstein elfogadja a berlini állást, de ő nem szeretne volna elhamarkodni a döntést, és kért egy kis gondolkodási időt. Ezalatt Planck és Nernst hegymászótúrára ment a Svájci Alpokba. Einstein megígérte, hogy választ ad, amint visszatérnek.

– Jelezni fogom a választ; amint megláttok, tudni fogjátok, hogyan döntöttem – mondta.

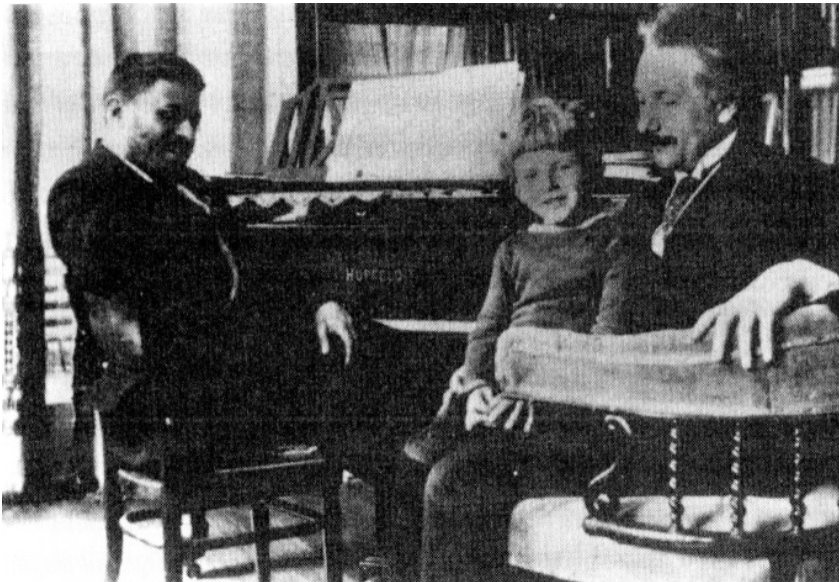
Amikor a két fizikus vonata begördült a zürichi pályaudvarra, látták, hogy Einstein a peronon várja őket, és piros rózsát tart a kezében.

Sokan nem értik, miért költözött Einstein szeretett Zürichjéből Berlinbe, ahol már megmutatkoztak a zsidóellenesség első jelei. Úgy látszik, több oka is volt a váratlan döntés meghozatalára. Először is, Berlin a tudományos életnek sokkal fontosabb központja volt, mint Zürich. Nem Planck volt az egyetlen ott dolgozó szellemóriás. Másodszor, Einstein itt olyan állást foglalhatott el, amely nem járt tanítással. Ez fontos szempont volt, hiszen Einstein gyakran panaszkodott, hogy a tanítás túl sok idejét és energiáját veszi el a kutatástól. A harmadik ok pedig az volt, hogy Einstein egy nagy csillagvizsgáló közelében szeretett volna letelepedni, hogy élő kapcsolatot tarthasson fenn csillagászokkal. Egyre nagyobb hiányát érezte, hogy fejlődőben lévő általános relativitáselmélete fényelgörbülési elemének még mindig nem volt meg a csillagászati bizonyítéka. Berlinben pedig van már egy olyan csillagász, akivel rendszeres levelezésben áll: Erwin Finlay Freundlich.

Einstein nem ismerte fel azonnal, hogy a Grossmann-nal kidolgozott egyenletekkel valami baj van. 1913 elején levelet írt barátjának, Paul Ehrenfestnek (1880-1933), amelyben összefoglalta az elért eredményeket. „A gravitáció problémáját végre megnyugtatóan megoldottuk. Bizonyítható, hogy nem léteznek az erőteret a metrikus tenzor alapján meghatározó, általánosan kovariáns egyenletek.” Két év múlva azután Einstein rájött, hogy tévedett, és igenis általánosan kovariáns egyenleteket hozott létre – a gravitációs téregyenleteket. Ez Berlinben történt, az I. világháború leghevesebb szakaszában. De Einstein Zürichben hagyott egy érdekes kis jegyzetfüzetet, amelybe egyenletei levezetését és a gravitációs téregyenlet megalkotására tett kísérleteit írta. A könyvecskét nyolcvan évvel később találták meg a kutatók, és váratlan dolgokat derítettek ki belőle Einstein munkájáról.

Einstein és Grossmann útjai végleg elváltak, amikor Einstein elhagyta Zürichet. Grossmann a következő években szociális

kérdésekkel és politikával foglalkozott. Egyre nagyobb szerepet vállalt a mindenféle nemzetiségű volt hadifogoly diákok segélyezésében. 1920-ban a szklerózis multiplex első jelei mutatkoztak rajta; a betegség 1936-ban végzett vele. 1931-ben, miután Einstein általános relativitáselméletét a világ már régen elfogadta, Grossmann egy keserű értekezést írt az elmélet egyes elemei ellen; bizonyára feldühítette, amikor hallotta, hogy Einstein egy előadást tartott a témában. Einstein valószínűleg megbocsátotta ezt az árulást barátságuk és kutatási kapcsolatuk ellen, és 1955-ben megható, szerető hangon nyilatkozott Grossmannról, és kettőjük együttműködéséről. Arról is írt, hogy később rájött, hogy a matematikai problémát, amellyel ő és Grossmann hónapokon keresztül birkóztak, majdnem egy évszázaddal korábban már megoldotta egy német matematikus: Bernhard Riemann.



Paul Ehrenfest és Albert Einstein 1921 körül

Fotó: Willem J. Luyten, az AIP Emilio Segrè vizuális archívumából

6. *A krími expedíció*

„Még akkor is örülök, hogy a kollégák az elméletemmel foglalkoznak, ha ezt annak reményében teszik, hogy esetleg megcáfolhatják.”

*Albert Einstein, Erwin Finlay Freundlichhoz
írt levelében, 1914. augusztus 7.*

Krím félsziget, 1914. augusztus 1.

Amikor Németország hadat üzent Oroszországnak, az oroszok elfogtak egy német tudóst a Fekete-tengernél. Erwin Finlay Freundlichot Odesszába szállították, mert azt hitték, hogy német kém. Annyi biztos, hogy furcsa poggyásza volt: egy teleszkóp. Ezt elkobozták, és Freundlichot fogva tartották augusztus végéig, amikor őt és társait kicserélték néhány magas rangú, német fogságba esett orosz tisztre. Freundlich fogsága egész ideje alatt sikertelenül próbálta elmagyarázni, hogy ő egy tudós, aki a napfogyatkozást jött megfigyelni. Amikor visszaért Berlinbe, Freundlich azonnal meglátogatta Albert Einsteint. Vajon miért kockáztatta Freundlich az életét, és utazott egy ellenséges országba? Mit akart ott csinálni? És mi köze volt ennek Einsteinhez, egy német tudóshoz, aki először lemondott német állampolgárságáról, majd később visszakérte, hogy visszaköltözhessen Berlinbe?

Nem sokkal az után, hogy Berlinben találkozott Pollakkal, Erwin Freundlich az akkor még Prágában élő Einsteinnel kezdett dolgozni. 1912 áprilisában találkoztak Berlinben.

Einstein ekkor oldotta meg a gravitációs lencse problémáját.²⁰ Egy évvel később, nászútjuk során Freundlich és felesége Zürichben találkozott Einsteinnel. Amikor 1913 szeptemberében az ifjú házaspár vonata megérkezett a zürichi pályaudvarra, látták, hogy Fritz Haber várja őket a peronon. Ebben az időben ő volt a Kaiser Wilhelm Intézet igazgatója, és vele volt (kissé rendetlen, sportos ruhában és szalmakalapban) Albert Einstein.

Einstein meghívta a házaspárt Frauenfeldbe, ahol a relativitáselméletről tartott előadást. Onnan továbbutaztak a Konstanzi tó partjára, majd vissza Zürichbe. Einstein egész idő alatt Freundlichhal beszélt az elmélettel kapcsolatos problémákról, és az eredmények igazolási lehetőségeiről. November 8-án Einstein levelet kapott a kaliforniai Lick csillagvizsgáló egyik munkatársától, Campbell professzortól,

²⁰ Az, hogy Einstein pontosan hol és mikor találkozott először Freundlichhal, örök rejtély marad. Ronald Clark, aki az általa írt életrajz Freundlich-Einstein kapcsolattal foglalkozó részét a Frau Kathe Freundlichhal folytatott beszélgetésére alapozza, azt állítja, hogy a két tudós először Zürichben találkozott, 1913-ban (*Einstein: élete és kora – Einstein: The Life and Times*, New York: Avon, 1984, 207. o.). Ezzel szemben Einstein azt írja egy levélben Michele Bessónak 1912. március 26-án Prágából, hogy hamarosan Berlinbe megy, ahol találkozik Planckkal, Nernsttel és „egy csillagással” (377-es dokumentum, *Albert Einstein összegyűjtött cikkei – The Collected papers of Albert Einstein*, szerkesztők: M. J. Klein és mások, Princeton University Press, 1993, V kötet). Nagyon valószínű, hogy ez a csillagász Freundlich lehetett, mivel ő az egyetlen, akivel Einsteinnek bármi kapcsolata volt ebben az időben. Megtalálták azt a határidőnaplót, amelybe Einstein berlini tartózkodása során feljegyezte a találkozóit, és Jürgen Renn és berlini Max Planck Tudománytörténeti Intézetbeli kollégái fel is dolgozták a benne foglaltakat. Bár a jegyzetfüzet értékes csillagászati gondolatokat tartalmaz, és több találkozóra van benne utalás névvel és időponttal, Freundlich neve nem tűnik fel. A legmeggyőzőbb bizonyíték azonban 1935-ből származik. Ezt a levelet Leo W. Pollak írta Einsteinnek (11-180-as dokumentum, Jeruzsálemi Einstein Archívum), és ebben megemlíti, hogy a két tudóst ő mutatta be egymásnak 1911-ben.

akitől azt kérte, hogy fényképezzék le a Naphoz közeli csillagokat egy napfogyatkozás során, és küldjék el a fotókat Freundlichnak elemzésre. Az elemzés sajnos nem vezetett eredményre.

Einstein és Freundlich kapcsolatát elsősorban abból a 25 fennmaradt levélből ismerjük, amelyeket Einstein írt a nála fiatalabb csillagásznak 1911 és 1931 között.²¹ A levelekből egy lenyűgöző történet bontakozik ki, amelynek nem minden részlete volt eddig ismert. A történet a sors szeszélyéről szól. Arról, hogy a világ legnagyobb elméleti fizikusa mennyire vágyott feltevésének kísérleti bizonyítására, amelyet egy lelkes, fiatal csillagásztól várt. A háború és a politikusok gonoszságáról szól, és hogy ezek hogyan állnak az emberi tudásszomj útjába. De szól a szerencséről, a hitről, a bizalomról és az emberi kapcsolatok változékonyságáról is.

Amikor Einstein megtudta Pollaktól, hogy a fiatal csillagászt érdekli az ő munkája, Einstein visszaírt Freundlichnak. Levele udvarias, majdnem behízelt volt mind nyelvezetében, mind tartalmában. Első, és utána még sok más levelében Einstein – aki addigra már jól ismert fizikus volt, ha nem is az a világhíresség, amellyé egy évtizeden belül válni fog – a kezdő csillagászt „Mélyen tisztelt Kolléga úrként” szólítja meg. Később áradozva köszöni meg Freundlichnak, hogy érdeklődést mutatott egy ilyen fontos kérdés iránt (természetesen az általános relativitáselmületről van szó). Bátorítja a csillagászt, hogy tegyen meg mindent egy megfigyeléses bizonyíték megszerzésének érdekében, amely alátámasztaná az elmélet feltevéseit. Azt írja, hogy a csillagászok nagy szolgálatot tennének a tudománynak, ha ilyen bizonyítékot találnának. Einstein mondataiban bujkál egy kis elkeseredés is, és ha végigolvassuk a leveleket, láthatjuk, hogy bármire képes lett volna azért, hogy elmélete kísérleti bizonyítékát megkapja.

²¹ A gyűjtemény a New York-i Pierpont Morgan Könyvtárban található.

A tér elgörbül a nagy tömegű testek körül, és ha egy fénysugár halad el egy ilyen test mellett, az is elgörbül. Ráadásul, ha egy fénysugár felfelé halad egy gravitációs erőterben, veszít energiájából; ezt mutatja, hogy frekvenciája a spektrum vörös vége felé tolódik el (ez a gravitációs vöröseltolódás) – olyan ez, mint amikor valaki kifárad, mire egy magas csigalépcső tetejére ér. Einstein figyelmét a fénysugár elgörbülésének jelenségére összpontosította, mert biztos volt benne, hogy ez előfordul a természetben. Megkérdezte az ifjú csillagászt, tud-e módot arra, hogy egy ilyen eseményt észlelni lehessen.

Einstein sztoikusán válaszolt szeptemberben, amikor először kellett csalódnia Freundlich erőfeszítéseiben. Ezt írta: „Bárcsak lenne egy bolygó, ami nagyobb a Jupiternél! – de a természet nincsen segítségünkre kísérleteinkben.” Freundlich valószínűleg úgy döntött, hogy a Jupiter mellett elhaladó, a Földre érkező fény segítségével próbálta igazolni a fényelgörbülés elméletét. Sajnos gyakorlatban nem tapasztalta a jelenséget. Majdnem száz év távlatából visszatekintve könnyen megérthetjük, mi okozta Freundlich kudarcát. A fényelgörbülési jelenség nem túlságosan jelentős, és a Jupiter – bár a Földnél sokkal nagyobb – a Nap tömegének csak mintegy ezredrészével dicsekedhet. A bolygó tömege nem elég nagy ahhoz, hogy mérhető legyen az általa okozott fényelgörbülés.

Szeptember 21-én Einsteinnek új ötlete támadt. Rájött, hogy egy legalább a Naphoz hasonló tömegű testre van szükség, ha a fényelgörbülést észlelni szeretné. Megkérdezte a „Mélyen tisztelt Kolléga úrtól”, van-e esély arra, hogy nappal csillagfényt észleljenek. Nyilvánvalóan erre lenne szükség, mivel a csillagfény az űr egy távoli pontjából érkezik, és ha nappal is látható lenne egy olyan szögben, amely miatt fénye a Nap közelében halad el, az elhajlás észlelhető lenne, ha ismernénk a csillag valódi helyét. Össze lehetne hasonlítani a sugarak várt pozícióját a megfigyelt, ettől eltérő pozícióval,

amely eltérést az okozta, hogy a Nap közelében haladtak el – ez bizonyítaná a jelenség létezését. Einstein szeretne volna tudni, hogy a csillagászoknak módjukban áll-e nappal csillagokat észlelni, és egy olyan csillagot találni, amely az égbolton a Nap helyzetéhez közeli helyzetben található.

1913 elején Einstein egy levélben ismét megköszönte Freundlichnak, hogy olyan érdekes levelet írt neki, és hogy ennyire elkötelezett az Elmélet bizonyítására. Izgalmas részleteket is közölt a relativitás kiterjesztett elméletéről, amelyen folyamatosan dolgozott, és olyan kérdésekkel bombázta ifjú kollégáját, amelyek mind az utóbbi kíváncsiságát voltak hivatottak felkelteni. Einstein leveléből láthatjuk, mennyire vágyott már arra, hogy az elméletét befejezve lássa. Erős szavakkal illeti a rivális elméletekkel kapcsolatos érzéseit; itt Abraham, Mie és Nordstörn elméleteiről van szó. Gunnar Nordstörn (1881-1923) finn fizikus szellemes kutatásokat végzett Einstein téregyenleteivel kapcsolatban. Ezek kidolgozása során Einstein és Grossmann nem tudtak megszabadulni az egymástól függő paraméterektől. Nordstörn arra gondolt, hogy inkább egy másik általános relativitáselméletet alkot, amelyben c , a fény sebessége nem függ az Einstein egyenleteiben szereplő tértől. Einstein Freundlichhoz írt leveleiben ezt a törekvést eszeveszettnek minősíti. Einstein szerint Nordstörn elmélete túlságosan fantasztikus, de van rá egy kis esély, hogy igaz. Ha igen, akkor valóban igaz a gravitációs vöröseltolódás, viszont a fénysugarak elgörbülése nem. Einstein tehát megkettőzte erőfeszítéseit, hogy megtalálja végre annak bizonyítási módját, hogy a fénysugarak a nagy tömegű testek gravitációs erőterében elgörbülnek: egy ilyen kísérlet eldöntené, hogy kinek van igaza – Einsteinnek vagy Nordstörnmnek. Levelei nem hagynak kétséget afelől, hogy a harcot nem adja fel. Biztos benne, hogy az ő (még nem teljesen kész) elmélete a helyes.

Einstein ebben az 1913 elején írt levélben említi először a napfogyatkozást. Az előző évben még valószínűleg arra számított, hogy a Nap mellett elhaladó csillagfény nappal is megfigyelhető. Valamikor az év végén, vagy a következő év elején ő és Freundlich valószínűleg letettek erről a lehetőségről. Töprengéseik egy pontján viszont egyiküknek eszébe juthatott, hogy egy teljes napfogyatkozás kiváló lehetőséget biztosítana kísérletük lefolytatására. Ilyenkor ugyanis nappal van, a Nap fenn van, de a csillagok a Hold árnyéka miatt láthatóvá válnak. Így, bár a természet nem adott nekünk egy elég nagy Jupitert, létrehozta ezt a csodálatos jelenséget, amely körülbelül kétévenként előfordul *valahol* a Földön, és amely lehetővé teszi, hogy nappal figyeljük meg a csillagokat, és magát a Napot is.

Einstein izgatott lett, amint rájött ennek a jelentőségére. Egyik levelében azt írja Freundlichnak, hogy mint azt egy amerikai folyóiratban olvasta, egyszerre több optikai rendszert is kell ahhoz használni, hogy napfogyatkozáskor meg lehessen figyelni a Naphoz közeli csillagokat. Azt írja, ez „józan paraszti ésszel” is belátható. Következő leveleiben azonban egyáltalán nem laikusként ír a csillagászatról. A nagy elméleti tudós nyilván rájött, hogy elmélete önmagában nem sokat ér kísérleti bizonyítékok nélkül. Rövid idő alatt sok mindent kellett egyedül megtanulnia a csillagászatról. Sok levelében tett fel technikai kérdéseket arról, hogy hogyan kell egy olyan rendszert megtervezni, amely alkalmas a napfogyatkozás megfigyelésére, és hogyan kell elkészíteni a legmegfelelőbb fényképlemezeket, amelyekkel megörökíthetők lesznek a Nap közelében lévő csillagok.

1913. augusztus 2-án Einstein ismét kijelentette: „Az elméleti következtetés már megvan – teljesen biztos vagyok benne, hogy a fénysugarak elgörbülnek. Rendkívül érdekel nappali csillagmegfigyelési terve.” Utána hosszasan írt arról, hogy a légkörben lebegő apró szemcsék hogyan

befolyásolhatják a látási viszonyokat és a készítendő képek minőségét, valamint írt még más csillagászattechnikai kérdésekről is. A következőket is elmagyarázta Freundlichnak: „Optikai rendszer használatakor az egész Napnak a képen kell lennie, az ég azon részével együtt, amely minket érdekel – az egész kerüljön egy lemezre. Jobb lenne, ha egyszerre két optikai rendszert használnánk, de még nem tudom, hogy a két képet hogyan tudjuk egyszerre használni. Nagyon szívesen hallanám a véleményét erről, és a lehetséges többi módszerről is.” Úgy látszik, Einsteinnek annyira fontos volt, hogy minden jól sikerüljön, hogy még a legkisebb részletekbe, a csillagászok rutinfeladataiba is beleszólt.

Einstein ugyanebben az időben a fényelgörbülés mellett egy másik problémával is foglalkozott. Ugyanebben a levélben többször is megemlítette, hogy nagyon érdekli Freundlich kettős csillagokkal kapcsolatos kutatása. Freundlich olyan rendszereket keresett, amelyekben két csillag kering egymás körül. Arra gondolt, hogy ha meg tudná becsülni a csillagok együttes tömegét, és egymás körüli sugárirányú sebességüket, esetleg észlelhető lenne az Einstein általános relativitáselmélete által megjósolt gravitációs vöröseltolódás, amikor az egyik fénye a másik mellett halad el. Ez a kísérlet sajnos zsákutcába vezetett. Sem Freundlich, sem mások nem jutottak eredményre. A jelenséget végül az 1960-as években sikerült észlelni a Harvard Egyetem kísérlete során. Freundlich ilyen irányú kutatásai során súlyos számítási hibákat vétett, amelyek bosszantották Einsteint. A levél azzal a kijelentéssel zárul, hogy ha egy ilyen kísérletből az derülne ki, hogy a fény *sebessége* változik meg (tehát nem a frekvenciája, amit a vöröseltolódás mutatna), akkor „az egész relativitáselmélet, beleértve a gravitációs elméletet is, hamisnak bizonyulna.” Végül Einstein leírta, milyen boldog lenne, ha találkozhatna Freundlichhal annak zürichi nászútja során.

Mire Einstein a következő levelet megírta Zürichben, 1913. október 22-én, svájci találkozásuk már megtörtént. Rengeteget beszéltek a távoli csillagok Nap mellett elhaladó fényének elgörbüléséről. Az odavetett „Herr Kollege” megszólítás után Einstein így folytatja: „Szívből köszönöm a sok hírt, amelyet elmondott nekem, és hogy ilyen mély érdeklődést tanúsított problémánk iránt.” Freundlich valószínűleg megpróbált olyan fényképeket szerezni, amelyeket a csillagászok régebbi napfogyatkozásokkor készítettek, és ezeken keresett a Nap árnyékához közeli csillagokat. Ezek a kísérletek sem vezettek, eredményre. Nem nehéz megérteni, miért. Bár teljes napfogyatkozás esetében maga a Nap teljesen el van takarva, ugyanez nem mondható el az udvaráról. A rejtett Napból fényes tűznyelvek nyúlnak ki nagy távolságra a Hold árnyéka mögül. A napudvar területén lévő csillagok nagyon rosszul láthatók, és fénytőlódásuk csak egy különlegesen erre a célra kifejlesztett kísérlet során lenne észlelhető. Sajnos ilyen kísérletet eddig soha senki nem végzett, mivel senki nem akarta a Naphoz közeli csillagok pontos helyzetét felmérni.

A levél hátralévő részéből kiderül, hogy a napfogyatkozás Einstein ötlete volt, és nem Freundliché. A levélből következtethetünk továbbá Freundlich nemtörődömiségére is – ez később is megmutatkozott, amikor a kettős csillagok tömegének kiszámításában elemi hibákat követett el. Einstein levelében hosszasan cáfolta Freundlich meggyőződését, hogy a csillagfény elgörbülését nappal, napfogyatkozás nélkül is észlelni lehet. Einstein udvariasan beszámolt arról, hogy megkérdezte az ottani csillagászokat, hogy van-e értelme ezzel próbálkozni, és ők határozott „nem”-mel feleltek.²²

1913. december 3-ára Einstein és Freundlich megegyeztek a fénysugarak Nap melletti görbülésének igazolására tett kísérlet helyszínében: egy expedíciót *kell* szervezni, amely megfigyelné

²² Ez a mutatóvány ma sem sikerülne. Még napfogyatkozás alatt is csak egy bonyolult eljárással lehet kimutatni a fénysugár elgörbülését.

az 1914 augusztusában a Krím félszigeten várható teljes napfogyatkozást. A részletekkel nagyjából már tisztában voltak, csak azt nem tudták, ki fogja az expedíciót finanszírozni. Amikor Einstein megtudta Freundlich-tól, hogy minden el van rendezve: az utazás Oroszországba és onnan a Krím félszigetre, az általa tervezett távcsőrendszer használatának módja, a Nap és a körülötte lévő égbolt fotózása a napfogyatkozás alatt, és ezen felvételek összehasonlítása az éjszakai égbolttal, amikor a Nap körüli csillagok a megszokott helyükön vannak – azonnal kapcsolatba lépett Planckkal. Arra kérte, segítsen neki pénzügyi támogatást szerezni ahhoz, hogy bebizonyítsa az általános relativitáselmélet azon területét, amelyet érzése szerint már kidolgozott.

A porosz akadémiát azonban szemmel láthatóan nem érdekelte eléggé a terv ahhoz, hogy pénzt áldozzon rá. Einstein december 7-én azt írta Freundlichnak, hogy Planckot érdekli a probléma, de ha az akadémia nem segít, ő, Einstein kész szerény megtakarításait az expedícióba fektetni. Einstein, valószínűleg elkeseredett mérgében, aláhúzta levelében a következő mondatot: „*Nem írok Struvének.*” Hermann Struve a potsdami Királyi Csillagvizsgáló igazgatója volt. Einstein azt remélte, hogy talán ez az intézmény anyagilag melléljük áll, de ezek szerint visszautasították. Hozzáteszi még: „Ha végképp nem sikerül, saját szerény megtakarított pénzemből fizetem legalább az első 2000 márkát. Kérem, mindenképpen rendelje meg a szükséges lemezeket, és ne vesztegessük az időt pénzügyi akadályok miatt.”

Azután a tudományos és a történelmi események hirtelen megindultak, és megállíthatatlanul haladtak előre. 1914. április 6-án Einstein és családja Zürichből Berlinbe költözött. Haber segítségével lakást is talált, de Mileva és Albert hamarosan különváltak, az anya és a gyerekek visszatértek Svájcba. Einstein egy legénylakásba költözött, és úgy látszik, elfogadta a változást, bár két fiát nagyon szerette. Újra felvette a

kapcsolatot a berlini rokonsággal, egyik unokatestvérét, Elsa Einsteint különösen kellemesnek találta, és szoros barátságba kerültek. Milevától elvált, és öt éven belül feleségül vette Elsát.

1914. július 2-án Einstein a porosz akadémia tagja lett. 34 évével ő volt a legfiatalabb. A többi akadémikus mind hosszú tudományos munkássággal és magasabb életkorral dicsekedhetett. Tanúk elmondása szerint, akik a kollégáival folytatott zürichi beszélgetésekről számolnak be – ekkor még nem volt tudomása a rá váró kitüntetésről – Einsteint nem nagyon érdekelte a hírnév. Ennek ellenére nagyon jó székfoglaló beszédet mondott, amelyben megköszönte, hogy beválasztották, és azt is elmondta, mennyire örül, hogy új tisztsége lehetővé teszi, hogy teljes munkaidejében kutatással foglalkozhasson. Az akadémia tagjaként ugyanis nem kellett többé tanítania, és más kötelezettségei sem voltak – minden idejét kutatással tölthette. Kollégáival folytatott levelezéséből tudjuk, hogy szeretett Berlinben élni, és meg volt elégedve azzal a státussal, amelybe akadémiai tagsága helyezte. Arra is több lehetősége volt, hogy a kísérlethez pénzt szerezzen – neki is látott újult energiával.

Az ügyben, amelyben Einstein nem jutott semmire Zürichben, Freundlich egy kis lépéssel előrébb lépett: Struve igazgató (nem szívesen, de) beleegyezett, hogy a fiatal csillagász megfigyeléseket tegyen a napfogyatkozás ideje alatt, de a csillagvizsgáló anyagi támogatása nélkül. Einstein, immár berlini akadémikusként keményen elkezdett dolgozni a pénz problémájának megoldásán. Végül az akadémia hajlandó volt 2000 márkát áldozni a kísérletre – éppen annyit, amennyit Einstein is adott volna saját megtakarított pénzéből – a napfogyatkozás megfigyelésére szolgáló tudományos eszközök előállítására, és a szükséges fotólemezek beszerzésére. Még 3000 márka hiányzott a Krím félszigeti expedícióhoz, az úti- és szállítási költségekre. A napfogyatkozás történetének egyik

furcsasága, hogy e pénz olyan forrásból származott, amely visszatekintve eléggé valószínűtlenül hat.

Gustav Krupp (1870-1950) német iparmágnás fegyvergyára ebben az időben már több tömegmészárlásért volt közvetve felelős, például a törökök is Krupp-fegyvereket használtak az örmények elleni népiirtás során. 1918-ban Krupp különlegesen nagy hatótávolságú fegyvereket tervezett kifejezetten arra a célra, hogy Párizs civil lakosságát 118 km távolságból bombázhassa; meg is öltek 256 párizsi polgárt.²³ Hitler Krupp pénzéből kezdhette el küzdelmét a versailles-i egyezmény ellen, és közvetve ez segítette hozzá, hogy 1933-ban többséget szerezzen a Reichstagban, majd kizárólagos hatalomhoz jusson Németországban. A cég látta el a II. világháború során a nácikat a rémuralmukat lehetővé tevő eszközökkel. 1914-ben Gustav Krupp 3000 márkával támogatta az Einstein általános relativitáselméletét bebizonyítani induló expedíciót.

Einstein egyre izgatottabb, türelmetlenebb és zárkózottabb lett a kitűzött indulási idő közeledtével. Ronald Clark életrajzíró elmeséli, hogy Einstein gyakran látogatta a Freundlich családot a tervezett napfogyatkozási expedíció előtti feszült időkben. Semmit nem bízott a véletlenre, ezért Freundlichot, az expedíció vezetőjét, folyamatosan szem előtt tartotta. Gyakran munkát is hozott magával a Freundlich házba, ahol vacsora után félretolta a tányérját és egyenleteket írt a háziak drága asztalterítőjére. Évekkel később Freundlich özvegye elmesélte Clarknak, hogy sajnálja, hogy nem tartotta meg a terítőt, ahogyan azt a férje javasolta, mert manapság igen sokat érne.²⁴

Einsteinben két érzés dolgozhatott ebben az időszakban. Először is, alig várta a napfogyatkozási expedíció eredményét.

²³ Martin Gilbert, *A huszadik század története* – A History of the Twentieth Century, 1. kötet, New York: Morrow, 1997, 490. oldal.

²⁴ Ronald W. Clark, Einstein: Élete és kora (Einstein: The Life and Times), New York: Avon, 1984, 222. o.

Már szert tett némi hírnévre, hiszen speciális relativitáselméletét viszonylag jól fogadta a tudományos világ, bár maradtak még kételkedők. A gyermekcipőben járó általános relativitáselmélettel is egyre többen foglalkoztak; sokan támadták és sokan kételkedtek benne. Akadémiai kollégái idősebbek voltak és hagyományosabb nézeteket vallottak, így hagyományosabb karriert is futottak be – Einstein mindenképpen kívülállónak érezhette magát. Ez valószínűleg zavarta, és úgy próbált helyzetén változtatni, hogy a megszokott és szeretett kényelmes ruhái helyett a státusának megfelelő tiszteletre méltó viseletet öltött. Mindent megadott volna, ha a teret, az időt és a gravitációt egyszerre figyelembe vevő, elrugaszkodott elmélete bizonyítást nyer. Egyre biztosabb is volt elmélete helyességében. Jó barátjának, Michele Angelo Bessonak ezt írta: „Akár sikerül az expedíció, akár nem, már nem kételkedem az egész rendszer helyességében. Teljesen nyilvánvaló az egész értelme.” A sors iróniája, hogy Einstein tévedett: amekkora fényelgörbülést Freundlich a Krím félszigeten keresett, az a valóságosnak csak a fele volt. Einstein még Freundlich indulása előtt eldöntötte, hogy ha a kísérlet nem igazolja feltevését, az a kísérlet hibája! Igen jó példa ez arra, hogyan történhet meg, hogy egy, a természetes világot leírni szándékozó egyenlet saját életre kel, és kiötlője annyira elegánsnak, és nagyszerűnek tartja, hogy a valóság a második helyre szorul.

1914. július 19-én Erwin Freundlich két kollégájával együtt – egyikük Carl Zeiss, a híres német lencsegyáros alkalmazottja volt – elindult Berlinből. Egy hét múlva megérkeztek a Krím félszigeten fekvő Feodoszija városába, és előkészítették a felszerelést a napfogyatkozás megtekintéséhez. Freundlich négy különböző fényképezőgépet hozott teleobjektívekkel, ezzel kívánta maximálissá tenni annak esélyét, hogy legalább egy jó felvételt készítsen, amelyen világosan kivehetők a Nap körüli csillagok a napfogyatkozás idején. A német csapathoz

egy argentin csoport is csatlakozott, akik más célból szándékozták a napfogyatkozást lefényképezni. Ők a Vulkánt szerették volna megörökíteni – ez egy feltételezett kisbolygó a Nap mellett, amelynek létezésére a Merkúr pályájának egyébként megmagyarázhatatlan, de rendszeres eltéréseiből következtek. Úgy gondolták, a Vulkán és a Nap körüli vélt pályája okozza a Merkúr napközeli pályaelteréseit. Ismét egy furcsa fordulat a történetben, hogy végül is az oldja majd meg az argentinok problémáját, aminek bizonyítását a németek kísérik meg: Einstein általános relativitáselmélete. A Merkúr pályájának elfordulását nem egy másik bolygó okozza, hiszen nincs is ilyen bolygó, hanem a Nap gravitációs tere hat a közeli Merkúrra. Néhány évvel később Freundlich összeállította a csillagászat történetében előforduló Merkúr-megfigyelések listáját, amelyek az általános relativitáselmélet segítségével megoldották a problémát. A Krím félszigeten az argentin és a német csapat információkkal segítette egymást, és együttműködtek a technikai kérdésekben is, még a felszerelést is megosztották szükség szerint – és feszülten várták augusztus 21-ét, amikor a Nap két percre el fog tűnni.

A történelmet eközben más erők hajtották – olyan erők, amelyek ellentétesek a tudomány és a tudás céljaival. Három héttel azelőtt, hogy Freundlich elindult Berlinből a Krím félszigetre, Ferenc Ferdinánd főherceg, az Osztrák-Magyar Monarchia trónörököse a birodalomhoz csatolt Bosznia fővárosába, Szarajevóba látogatott. A szerb külügyminiszter – a diplomáciában szokatlan módon – figyelmeztette a főherceget, hogy a szerbek mozgolódnak a városban, és nem biztos, hogy ez a megfelelő időpont a látogatásra. Ferenc Ferdinándot ez nem térítette el szándékától. Június 28-án, amint az autókonvoj a városházán rendezett ünnepségre vitte a trónörököst, egy bombát dobtak az autójába. Felrobbant, de a főhercegnek és feleségének, Hohenberg hercegnőjének nem esett bántódása. A merényletsorozat tovább folytatódott az osztrák-magyar

főherceg ellen; az úton újabb összeesküvők várták. Még egy bombát dobtak az autóba, ez azonban nem robbant fel. Továbbhaladtak, és útjuknak egy olyan pontjára értek, ahol egy kicsit hátra kellett tolatni. Ebben a pillanatban a harmadik összeesküvő, egy Gavrilo Princip nevű tizenkilenc éves diák pisztolyt rántott, és lelőtte Ferenc Ferdinándot és feleségét. Az összeesküvők egy Fekete Kéz nevű terrorszervezethez tartoztak, amely történetesen a szerb kormány ellen dolgozott. A csoport célja a függetlenség kivívása volt: a délszláv népek el akartak szakadni a Habsburg Birodalomtól. A gyilkosság lökéshullámokat indított el az egész világon. Az első világháborút hozó viharfelhők gyülekezni kezdtek Európa egén. A Habsburgok és szövetségeseik, a német császár hangot adtak haragjuknak. Úgy látszik azonban, hogy Freundlich Krím félszigeti expedíciójának szervezőit teljesen hidegen hagyták a helyzet politikai következményei, az akkor már küszöbönálló, Oroszország elleni háború lehetősége eszükbe sem jutott. Miközben a nemzetóriások ugrásra készen álltak egymással szemben, Freundlich és csapata nyugodtan készülődött egy olyan napfogyatkozás megfigyelésére, amely augusztus 21-én, egy orosz fennhatóság alatt álló területen fog bekövetkezni.

A császár éppen egy vitorlásversenyen vett részt Kiel kikötőjében, amikor jachtjába egy arany cigarettatárcát dobtak. A tárcában egy üzenetet talált. Így közölték vele Ferenc Ferdinánd főherceg halálának hírét. A császár haragra gerjedt, és haladéktalanul visszatért Berlinbe. Bécsi követe azt javasolta, hogy szabjon ki enyhe büntetést a szerbekre, de II. Vilmos engesztelhetetlen volt. Úgy döntött, a szerbektől „meg kell szabadulni – mégpedig gyorsan”. A német közvélemény támogatta ebben, és július 4-én az angliai német nagykövet azt mondta Lord Haldane-nek, hogy aggódik a kialakult helyzet miatt, és attól fél, hogy a háború elkerülhetetlen. Anglia nyugalomra intette a német nagykövetet, mert még bíztak a béke lehetőségében. Egy háborúval ők csak veszíthettek. Nem

így Németország és az Osztrák-Magyar Monarchia. A császár már régóta hadat szeretett volna üzeni Oroszországnak. Úgy gondolta, Oroszországot meg kell állítani, mielőtt az kiterjeszti uralmát Európa fölé, veszélyeztetve ezzel a németek uralkodó szerepét. II. Vilmos erős támogatást ígért Ferenc József császárnak, ha meg akarja büntetni a szerbeket fia haláláért – mindezt annak ellenére, hogy a főherceg meggyilkolása után folytatott vizsgálatok nem találtak bizonyítékot arra, hogy ebben szerepe lett volna a szerb kormánynak.

1914. július 23-án az Osztrák-Magyar Monarchia hivatalos ultimátumot küldött Szerbiának. A dokumentum egyedülálló a nemzetek történetében, hiszen ebben az Osztrák-Magyar Monarchia gyakorlatilag előírta Szerbiának, mit tegyen bel- és külügyeiben. Az ultimátum tizenöt követelést sorolt fel, például azt, hogy a szerb kormány a határokon belül tiltsa meg minden osztrákellenes propagandát, vagy azt, hogy osztrák hivatalos szervek is vegyenek részt a gyilkosságot kivizsgáló bizottságban. Ha Szerbia nem egyezik bele a követelésekbe, Ausztria hadat üzen. A szerbek egy kivételével eleget tettek volna minden követelésnek, de Ferenc József tárgyalás helyett mozgósította erőit, és készült a támadásra. A szerbek erős orosz támogatásra számítottak szövetségesüktől, a németek pedig készen álltak megsegíteni a Monarchiát. Az orosz cár megpróbálta elkerülni a háborút, és július 27-én azt ajánlotta, hogy a két fél tárgyaljon egymással, de az osztrák kormányzat ezt gondolkodás nélkül elutasította. Az európai hatalmaknak el kellett dönteniük, hogy ha fegyveres összeütközés tör ki, melyik oldalra álljanak; elkerülhetetlen volt, hogy a helyi konfliktus világháborúvá fejlődjön.

Miklós cár augusztus 1-jén kora reggel másodszor is a német császárhoz fordult, és hosszú barátságukra hivatkozva kérte, hogy kerüljék el, hogy a két nemzet egymás vérére ontson, de Vilmos hajthatatlan volt. Azonban azt remélte, hogy a háború csak keletre terjed ki, Franciaországot és a Németalföldet nem

támadják meg. Tábornokai viszont már a nyugati front tervét is kidolgozták. Még aznap német csapatok hatoltak be Luxemburgba, és elfoglalták Trois-Vierges falut. A császár nem szeretne volna, ha a háború továbbterjed, ezért a csapatokat visszarendelte Németországba, majd néhány órán belül meggondolta magát, és a német hadsereget Luxemburgba és Belgiumba küldte. Ugyanezen a napon este V György király kétségbeesett táviratokat küldött Londonból Berlinbe és Szentpétervárra; az utolsó pillanatig remélte, hogy meg tudja akadályozni a világháborút. Sajnos kísérletei nem vezettek eredményre. Késő este az oroszországi német nagykövet felkereste az orosz külügyminisztert szentpétervári palotájában, és átadta a hadüzenetet.

A háború kitörésének pillanatában a Freundlich vezette német kutatócsoport hirtelen egy ellenséges terület belsejében találta magát. Mivel a németeknél nagyfelbontású optikai eszközök voltak, nem volt nehéz őket kémkedéssel gyanúsítani. 1914 augusztusának elején letartóztatták Freundlich csapatát. A tudósokat hadifogolynak tekintették. Einstein rettenetesen aggódott. Ezt írta Paul Ehrenfestnek augusztus 4-én: „Kedves csillagászom, Freundlich Oroszországban hadifogoly lesz, és így nem fogja tudni megfigyelni a napfogyatkozást. Aggódok érte.” A hadifoglyokat a Krím félszigetről Odesszába szállították, és ott majdnem egy hónapig fogva tartották. Szerencsére azonban a németek éppen ebben az időben fogtak el néhány magas rangú orosz tisztet. Az oroszok hajlottak a fogolycserére, és a porosz akadémia közbenjárására a német kormány beleegyezett, hogy az orosz tisztékért kicseréli Freundlichot és kollégáit. Szeptember 2-án Freundlich visszaérkezett Berlinbe, de Einstein reménye, hogy elmélete a napfogyatkozás megfigyelésével nyerjen bizonyítást, meghiúsult.

Bár Freundlich a háborús évek fennmaradó részét végig Berlinben töltötte, és volt olyan is, hogy Einsteinnek dolgozott,

kettőjük viszonyát a történetek megkeserítették. Einstein egyik leveléből megtudjuk, ő milyen szemszögből nézte az eseményeket. 1921. szeptember 10-én így írt Freundlichnak: „Nem hiszem, hogy jól tennénk, ha találkoznánk. Örülök, hogy már jobban értjük egymást, mint 1914-ben. Kapcsolatunk javulását az angolnak köszönhetjük.” Ezek szerint Einstein nem a háborút hibáztatta az események szerencsétlen alakulásáért, hanem Freundlichot, aki pedig az életét és a szabadságát kockáztatta az ő elméleteért. Einstein haragja öt évig tartott, addig, amíg egy angolnak sikerült az, amit Freundlichtől megtagadott a sors.²⁵

Akárhogyan is, 1919-re Einstein általános relativitáselmélete készen állt, és Einstein kijavította a Nap tömegvonzása miatti fényelgörbülés szögére vonatkozó számítását. Ez utóbbi 1915. november 18-án történt, amikor Einstein bejelentette, hogy a Napot súroló fénysugarak görbülése 1,75 szögmásodperc, kétszer annyi, mint amennyit 1914-ben gondolt. Érdekes kérdés, hogy mi történt volna, ha a háború nem teszi tönkre Freundlich kísérletét – és ő 1,75 szögmásodpercet mér (plusz/mínusz egy kis kísérleti hibával) az Einstein által 0,87-nek gondolt helyett (Einstein tulajdonképpen még egy számítási hibát követett el, és így 0,83 szögmásodpercet kapott). Ez bizonyította vagy cáfolta volna az általános relativitáselméletet?

Meg kell jegyeznünk, hogy a kisebbik érték, a 0,87 szögmásodperc (ha kijavítjuk a számítási hibát) abban az esetben vonatkozik a fényelgörbülésre, ha a fénysugarat

²⁵ Az idézett levélből világosan látszik, hogy Einstein és Freundlich viszonya akkor kezdett romlani, amikor a napfogyatkozási expedíció meghiúsult. Más kutatók, akik ezzel a kapcsolattal foglalkoztak, ezt valahogy nem vették észre. Egy mostanában megjelent könyvben (*Az Einstein-torony – The Einstein Tower*, Stanford University Press, 1997, 137-138. oldal), Klaus Hentschel azt állítja, hogy a két tudós viszonya 1921-ben romlott meg, mert Freundlich megpróbálta eladni Einstein egyik kéziratát, és ez feldühítette Einsteint.

részecsketermészetűnek tekintjük, és ezért a régi newtoni törvény vonatkozik rá. A kétszeres értéket akkor kapjuk, ha a relativitás fogalmát valóban beépítjük a törvénybe. Így tehát jó esély van rá, hogy ha a Freundlich-expedíció sikerrel járt volna, akkor sem fogadták volna el a tudományos körök a mért eredményt az általános relativitáselmélet bizonyításául. Lehet, hogy Einsteinnek türelmesebbnek kellett volna lennie, be kellett volna fejeznie az elméletet, és az igazolást hagyhatta volna későbbre – és nem kellett volna hűségese csillagászat hibáztatnia.

Az elkövetkező években Einstein sokféle módon mutatta ki hálátlanságát Freundlich felé, és csak sajnálni lehet a csillagászt, aki oly sok mindent kockáztatott Einsteinért, és már akkor hitt az elméletben, amikor a legtöbb tudós még kételkedett benne.

Einstein elutasító, sőt néha érzéketlen hozzáállása kiolvasható ez időben írt leveleiből. A csillagász már nem „Mélyen tisztelt Kolléga úr”; az 1914-es kísérlet kudarca óta a megszólítás egyszerűen „Kedves Freundlich”. Egy 1917-es (dátum nélküli) levélben Einstein ezt írja: „Tegnap Planck és Struve önről beszélgettek. Struve szidta önt. Mint mondta, nem végzi el a kiadott feladatokat. Úgy gondolja, az lenne a legjobb, ha elmenne elméleti csillagászatot tanítani, biztosan kapna ilyen állást. Azt hiszem, igaza van, hiszen nem mindenki dolgozhat csillagvizsgálóban. Üdvözlettel, A. Einstein.”

Einstein továbbra is fenntartotta a levelezést Freundlichhal. Az utóbbi gyakran kért tőle segítséget álláskereséseihez és cikkeinek megjelentetéséhez. A levelek hangvételéből látszik, hogy Einstein már nagyon is benne volt a német tudományos elitben, és szívesen emlegette – mintegy véletlenül – híres barátja, Planck nevét. Freundlich nem tudott sokáig megmaradni egy helyen. Einstein így ír egyik levelében: „Azt hiszem, jó állás lenne az egyetemi előadói, de nehéz bejutni. Ne aggódjon emiatt, inkább élvezze a szabadságát. Végül minden

elrendeződik. Az idegei ziláltak, és a fején nincs egy vékony szelet szalonna se, hogy megvédje. Közös barátaink üdvözlétüket küldik önnek és feleségének. A. Einstein.” Egy másik levélben Einstein azt ígéri, hogy javasolni fogja, hogy az akadémia fogadja el Freundlich munkáját, *ha* Freundlich válaszol az általa feltett hat technikai kérdésre. 1919. március 1-jén Einstein azt írta Freundlichnak, hogy éppen most olvasott az angol csillagász, Arthur Eddington világos és érdekes munkájáról. Egy különös véletlen folytán éppen arról az Eddingtonról van itt szó, aki ezen a napon indult el egy, az egyenlítői Afrika partjaihoz közeli szigetre, hogy megfigyelje a napfogyatkozást, és hogy megpróbálja megfigyelni a fényelgörbülést, és ezzel bebizonyítani Einstein általános relativitáselméletét.

7. *A Riemann-metrika*

„Egy olyan geométer, mint Riemann, csaknem előre láthatta a mostani világ fontosabb jellemzőit.”

Arthur S. Eddington

Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826-1866) egy lutheránus lelkész hat gyermeke közül másodikként látta meg a napvilágot Breselenzben, a Hannoverhez közeli kis faluban. Riemann szerény körülmények között nevelkedett, és rövid élete során állandó egészségügyi problémákkal küszködött. Azt szokták mondani, hogy ha Riemann egészségesebb lett volna, és csak egy kicsit tovább él, a matematika számos ága gyorsabban fejlődött volna.

Riemannban már hatévesen megmutatkoztak a matematikai tehetség első jelei. Nemcsak megoldott bármilyen számtanfeladatot, de új problémákkal gyötörte csodálkozó tanárait. Tízéves korában matematikaórákat vett egy egyetemi tanártól, aki úgy találta, hogy a fiú jobb megoldásokat ad a feladatokra, mint ő. Tizennégy évesen Riemann feltalálta az öröknaptárt, amelyet ajándékba adott szüleinek.

Bernhard Riemann nagyon szégyenlős gyerek volt, és ezen úgy próbált segíteni, hogy rettentő sokat készült minden olyan alkalomra, amikor nyilvánosság előtt kellett beszélnie. Serdülőkorában már semmilyen kérdésben nem elégedett meg a tökéletesnél kevésbé jó megoldással, ezért készülődésben lévő munkáit soha nem mutatta meg senkinek. A kínos véletlenek elkerülésére irányuló hajlama később fontos szerepet játszott tudományos pályáján.

1846-ban a tizenkilenc éves Riemann beiratkozott a híres göttingeni egyetem teológia szakára. Azért döntött így, hogy örömet szerezzen apjának, aki szerette volna, ha fia követi őt az egyházi pályán. De Riemann hamarosan elbűvölték az akkor éppen az egyetemen tanító kiváló matematikusok, közöttük a nagy Gauss. Apja nem szívesen, de beleegyezett, hogy Riemann átiratkozzon matematika szakra. Egy egyetemi év után Riemann átment a berlini egyetemre, ahol kiváló matematikaoktatásban részesült olyan nagy tudósoktól, mint például Jacobi, Steiner, Dirichlet és Eisenstein. Két évig járt a berlini egyetemre. Az 1848-as politikai mozgalmak során Riemann besorozták a diákalakulatba, és egyszer tizenhat órán keresztül őrizte a királyi palotát egy nagy tüntetés alatt.

1849-ben Riemann visszatért Göttingenbe, hogy megírja doktori értekezését. Témavezetője Karl Friedrich Gauss volt. Riemann több fontos geometriai felfedezést tett, majd áttért a számelmélet területére. Riemann nevét sokan az általa felfedezett *zéta függvényről* ismerik, amelynek segítségével lehetővé válik a prímszámok tanulmányozása a komplex analízis segítségével. Az a kérdés, hogy a zéta függvény a komplex változó mely értékeire ad nulla eredményt, a matematika egyik legnépszerűbb problémája volt. Riemann, miután megpróbálkozott a matematika és a fizika több területével, 1850-ben arra a mély filozófiai meggyőződésre jutott, hogy létre kellene hozni egy olyan összetett matematikai elméletet, amelyben az elemi törvényeket venné kiindulópontnak, és azokat a nagy, általános „plenum”-ba (a folytonosan kitöltött térbe) transzformálná. Ez az elképzelés tette lehetővé számára az általános matematikai áttörést – és egy évszázaddal később majd erre alapul a fizikai tudományok forradalma.

1851 novemberének elején Riemann beadta doktori értekezését Gaussnak. A címe *A komplex függvények általános elméletének alapjai* volt. A munka olyan magas szintű volt, és annyira sokat adott hozzá a matematikusok akkori ismereteihez,

hogy Gauss – életében először és utoljára – melegen megdicsért valakit, saját magán kívül. És ez csak a kezdet volt, bár néhány év múlva már sem Gauss, sem Riemann nem élt.

1854-ben Riemann elfoglalta első oktatói állását a göttingeni egyetemen. Instruktorként volt, akit a hallgatók maguk fizetnek – általában minden egyetemi tanár így kezdte abban az időben Németországban. Az is szokás volt, hogy minden új oktatónak be kellett mutatnia egy még publikálatlan cikket a tanszéken; ez volt a székfoglaló előadás (a cikk neve *Habilitationschrift* volt). Riemann, aki ekkorra már fontos felfedezéseket tett a komplex analízis terén, és más területeken is, szokásos precizitásával készült előadására, hiszen Gauss, a nagy öreg és az egyetem minden fontos matematikusa hallani fogja előadását.

Riemann folyamatosan és a szokásos igényességével dolgozott a cikken. A hagyomány szerint a tanszék elé három különböző témát kellett betérjesztenie, saját tetszése szerinti sorrendbe állítva, és ezek közül valamelyiket fogják kijelölni, mint előadandó témát. Első két helyen olyan témákat jelölt meg, amelyek a fő kutatási területeit érintették, és természetesen azt remélte, hogy a tanszéken ezek közül fognak választani. A harmadik egy geometriai téma volt, amelyre nem készült fel a tőle megszokott alaposan. A tanszék általában az első két téma egyikét szokta választani, de legtöbbször az első – a harmadikat soha, ezért Riemann az első két témát tökéletesen kidolgozta.

Gaussnak viszont támadt egy ötlete. Emlékezzünk, ő évtizedeken át töprengett Eukleidész ötödik axiómáján és a nemeuklideszi geometriákon, miközben Bolyai és Lobacsevszkij is kidolgozta ugyanezt a területet. Gauss geometriai töprengései során eljutott a görbület fogalmához. Definíciója szerint az euklideszi tér *görbülete* nulla, a gömbfelület *görbülete* pozitív, a gömb hiperbolikus „ellentettjének” *görbülete* pedig negatív.

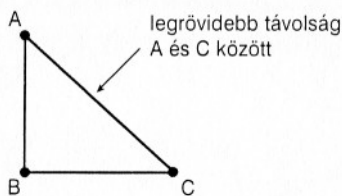
Gauss tudta, hogy Riemann-nak zseniális gondolatai vannak, és arra gondolt, hátha ő jutna el az áttöréshez. Kiadta tehát Riemann-nak a harmadik témát.

Az előadás kedvéért Riemann kidolgozott egy teljesen új elméletet. Korábbi eredményeire épített. Amikor a komplex számokkal és számelmélettel foglalkozott, Riemann a szabadidejében a tér filozófiáját tanulmányozta, és ő maga is felfedezte a Gauss-féle görbületet, nem csak Bolyai és Lobacsevszkij. Az a homályos érzése volt, hogy egy nagyon sok mindent átfogó elméletbe lehetne összegezni a többféle térfogalmat és -geometriát. Lehetséges volna az ismert elméleteket egyetlen olyan hatékony új rendszerbe foglalni, amely lefedi az összes eltérő részletet? Ez a gondolat állandóan benne motoszkált, akkor is, amikor éppen más területeken dolgozott. Az előadás időpontja vészesen közeledett, és még mindig nem tudta, hogy lehetséges-e egy ilyen általánosítás. Elérkezett a nagy nap, és az új matematikaoktatónak meg kellett tartania bemutatkozó előadását idősebb tanártársai előtt. A fiatalember által előadott elmélet örökre megváltoztatta a geometriát és a fizikai tudományokat. Mi is volt hát Riemann úttörő elképzelése?

Riemann az évszázad legjobb elméleti matematikusai közé tartozott, de még ennél is több volt. Nem hagyta nyugodni a kérdés, hogy milyen is valójában az őt körülvevő fizikai világ. Riemann előre ráérezett a relativitáselméletre és a modern kozmológiára, és tudta, hogy ahhoz, hogy megértsük a fizikai világot, teljesen tisztában kell lennünk a tér fogalmával. Számára a tér a *geometriát* jelentette. Riemann tehát a fizikai törvények geometriai vonatkozásait szerette volna leírni, ahol a geometria azt a teret írja le, amelyben élünk. Mindig is hajlott az általánosításra, és szeretett elvonatkoztatni a részletektől és az azokkal járó rabszolgamunkától; elvont és általános törvényekre törekedett. Riemann tisztában volt azzal, hogy háromféle geometria lehetséges: euklideszi, hiperbolikus és

elliptikus (vagy gömbi). Azt is tudta, hogy egy felület geometriája „menet közben” is megváltozhat: a dolgok például nem kizárólag gömbiek vagy euklidesziek. Elképzelhető olyan felület, amelynek geometriája pontról pontra változik. Riemann-nak egy igen hatékony eszközre volt szüksége az ilyen problémák kezeléséhez. Olyan módszert keresett, amellyel a felületek a geometriájuktól függetlenül írhatók le. És ezen a területen tette végül Riemann azt a felfedezést, amelynek segítségével Einstein azután majd be tudja fejezni az általános relativitáselméletet.

Riemann arra jött rá, hogy a térnek az a tulajdonsága, amelyet vizsgálnia kell, a *távolság* (más szóval „*metrika*”) fogalma. A sík euklideszi térben a két pont közötti legrövidebb távolság az ABC derékszögű háromszög AC átfogója, ha az x tengely irányában a távolság BC , és az y tengely irányában AB , mint ahogyan az ábrán is látjuk.



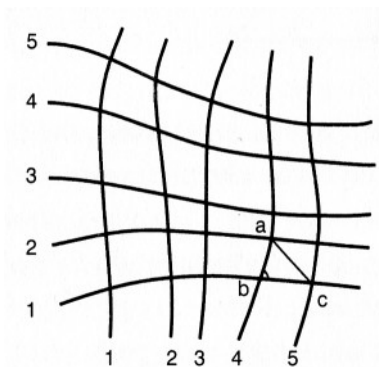
Riemann zsenialitása abban mutatkozik meg, hogy ezt a távolságfogalmat általánosította az olyan esetekre, amelyekben a felület nem sík. Például ha olyan felületről van szó, ahol a derékszög nem 90° -os, hanem φ , akkor a Pitagorasz-tétel ($c^2 = a^2 + b^2$) általánosítása: $c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \varphi$. Riemann egy függvénnyel definiálta a pillanatnyi távolságot általában, a tér görbületétől függetlenül, sőt még pontonként változó görbület esetében is. A távolságfüggvény négyzete:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu$$

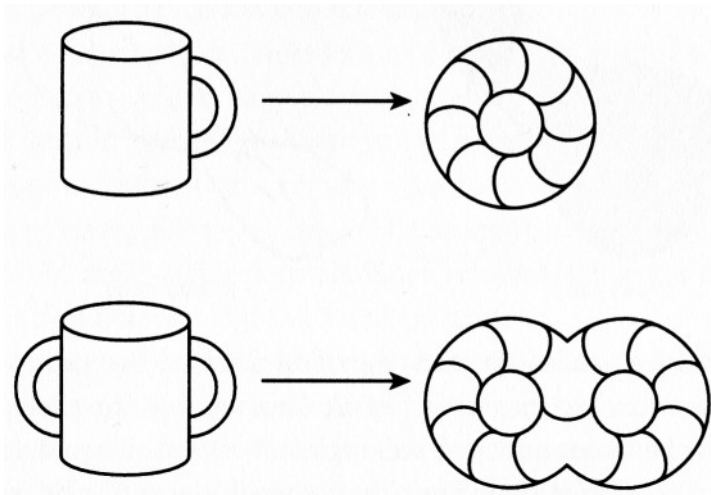
– ahol μ és ν értéke 1 vagy 2.

Hatvan évvel később Albert Einstein ugyanezt a képletet fogja használni, ahol a μ és ν indexek értéke 1, 2, 3 vagy 4, és a téridő dimenzióit jelentik (az első három a teret, a negyedik az időt) az általános relativitáselmélet egyenleteinek végső formájában. A $g_{\mu\nu}$ kifejezés döntő szerepet játszik Einstein tenzoregyenletében. Ez jelöli a metrikus tenzort, amelynek segítségével Einstein végre az elméletbe foglalhatta a világegyetemnek a gravitációs tér hatására bekövetkező deformálódását. Ha a μ és ν indexek értéke 1, 2, 3 vagy 4 lehet, és nem vesszük számításba a többször előforduló szorzatokat ($dx_1 dx_2$ megegyezik $dx_2 dx_1$ -gyel), akkor 10 különböző mennyiség szerepelhet a négydimenziós tér távolságnégyzetének kifejezésében (miért?).

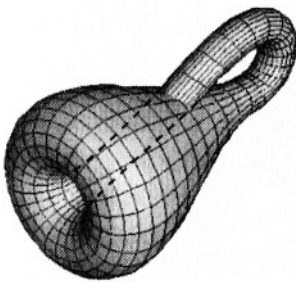
Riemann elmélete, amelyet a matematika történetének leghíresebb székfoglaló előadásán ismertetett, egy új tudományos területet nyitott meg. Ettől kezdve – a metrikus elemnek köszönhetően – nem kellett azzal törődni, hogy mi történik egy felület egy bizonyos helyén, és végre a tér egészével lehetett foglalkozni. A metrika segítségével a különböző eljárásokat bármely felületen lokálisan is lehetett alkalmazni.



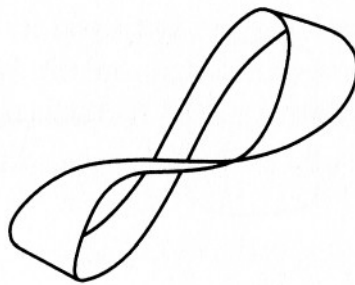
Ez egy teljesen új elmélethez vezetett: a differenciálgeometriához, amely azután majd a huszadik században fog igazán kifejlődni. Az általános megközelítésnek a topológiára is volt hatása. Riemann maga is tanulmányozott topológiai eljárásokat a komplex függvények elméleti problémáinak megoldása során. A topológia a terekkel és a folytonos függvényekkel foglalkozik; például olyan kérdésekkel, hogy egy felület vajon folytonos-e vagy több darabból áll, hogy egy pontsorozat vajon egy, a téren belüli, vagy egy azon kívüli ponthoz tart-e, és hogy lehetséges-e a végtelen tér lefedése véges számú részhalmazzal. Ezek általánosabb kérdések, mint amilyeneket a geometria vet fel, de a két terület szoros összefüggésben van. A topológiát onnan is ismerhetjük, hogy ez az a terület, ahol az ekvivalenciát a folytonos függvények megléte jelenti: ebben az értelemben egy úszógumi ekvivalens egy egyfülű bögrével, egy gömb ekvivalens minden más háromdimenziós zárt felülettel, és egy kétlyukú úszógumi egy kétfülű bögrével. Alább ábrázoljuk ezeket az ekvivalenciákat.



Végül is a topológia a felületek átfogó geometriájáról szól (ezt a teret hívják „ n ” dimenziós, Riemann-féle térnek is). Ez a tudományág tág teret biztosít az általánosításnak. A topológia tanulmányozásával a matematikusok a geometriaiaknál általánosabb és elvontabb tételekhez juthatnak el. Két jól ismert példa a Möbius-szalag: egy kétdimenziós felület, amely megcsavarodik a harmadik dimenzióban, és a Klein-palack: egy háromdimenziós felület, amely megcsavarodik a negyedik dimenzióban. A Möbius-szalagnak (névadója: A. F. Möbius, 1790-1868) csak egy oldala van. Ha ezt a felületet futószalagok esetében használják, meghosszabbítja a szalag élettartamát (mindkét „oldal” – ha egyáltalán beszélhetünk két oldalról – egyforma mértékben kopik). A Klein-palacknak nincsen belseje. Felix Klein (1849-1925) találta ki. Klein Plucker tanítványa volt, akit viszont Riemann 1854-es *Habilitationschrift*-je (székfoglaló előadása) inspirált. Klein nagyon szerette a geometriát, és a geometriai tételek topológiai kiterjesztését tűzte ki célul maga elé. Ehhez a *csoport* algebrai fogalmát használta. Klein a csoportelmélet segítségével a topológiában megtette azt, amit Riemann a geometriában: magas szintű egységességet és absztrakciót ért el.



a Klein-palack



a Möbius-szalag

Riemann munkássága közvetlenül és közvetve is szerepet játszott a fizikai világ megértésében. A Gauss és a göttingai

kollégák által remekműként ünnepelt székfoglaló/beavató előadásán bemutatta azt az eszközt, amelynek segítségével Einstein majd le fogja írni az általános relativitáselmélet téregyenletét. Riemann topológiai munkássága, és az ez alapján elinduló Klein és további követői hatására később az angol Sir Roger Penrose egy meglepő tétellel állt elő. A matematikus tétele, amely Einstein általános relativitáselméletén nyugszik, és hatékony topológiai módszereket alkalmaz, magyarázatot ad arra, hogyan kezdődött el a világegyetem.

Riemann geometriai kutatásai napjaink differenciálgeometriájához vezettek. A terület csúcspontját jelentik azok az eredmények, amelyeket 1979-ben a princetoni egyetemen tartott Einstein centenáriumi szimpóziumon mutatott be S. S. Chern (a cikk 1980-ban jelent meg). A cím: „A relativitás és a Riemann utáni differenciálgeometria” volt. Az előadás szerint az általános relativitáselmélet jövője még nagyobb matematikai általánosság felé mutat. Chern arra jutott, hogy a Riemann-metrika még fejlettebb és bonyolultabb foglalkozássá általánosítható, amelyeket csak a huszadik század végén dolgoztak ki. Lehet, hogy ezek a hatékony, új matematikai eszközök – amelyeknek némelyike még ki sincsen teljesen dolgozva – egy nap majd lehetővé teszik világegyetemünk igazi természetének leírását. Az is lehet, hogy egyszer majd elérhetővé válik az, ami Einsteinnek a kitartó munka ellenére sem sikerült: az összes fizikai erő egységesítésének elmélete; „a minden elmélete”.

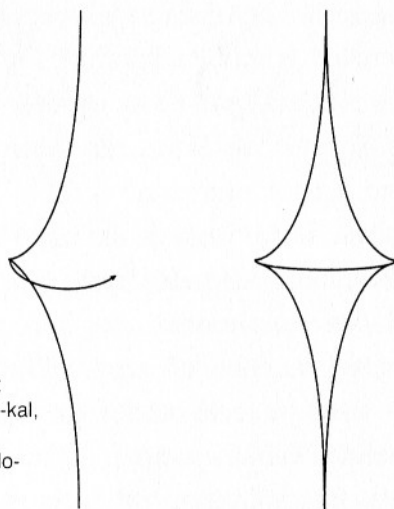
A kis és nagy geometriai, és az alak és tér általánosításából keletkező topológiai témák tárgyalása után eljutottunk egy fontos kérdéshez. Milyen az életterünként ismert világegyetem geometriája? Egy nagy négydimenziós gömbben lakunk? Egy gyűrűben? Vagy esetleg egy nagy Klein-palackban? Ez az egyik legfontosabb filozófiai kérdés, amelyet Einstein általános relativitáselmélete és a huszadik századi kozmológusok munkája vet fel.

Riemann geometriája korlátozott értelemben a Saccheri által a tompaszögekről kidolgozott feltételezésen alapuló nemeuklideszi geometria egy modellje. Ez a modell egy háromdimenziós gömb felülete. Itt a háromszög szögeinek összege több mint 180° . A geometria „egyenesei” – azok az ívek, amelyek a legrövidebb vonallal kötik össze a gömbfelület két-két pontját – főkörök. Az Északi-sark és az Egyenlítő egy szakasza által bezárt háromszögben, amelynek a szárai hosszúsági körök, a szögek összege nyilvánvalóan több 180° -nál. Ebben a geometriában egy kör kerülete kisebb, mint az átmérő és π szorzata. Így ha egy gömböt négydimenziós objektumnak tekintünk, akkor egy nemeuklideszi geometria egy különleges modelljét kapjuk. A nyílt, nemeuklideszi tér az általában vett világegyetem egy másik lehetséges modellje. De mit gondoljunk arról a négydimenziós térről, amely olyan értelemben nemeuklideszi, mint a Bolyai-Lobacsevszkij geometria? Itt, mint már megjegyeztük, a háromszög szögeinek összege *kevesebb*, mint 180° , és egy kör kerülete *több*, mint az átmérő és π szorzata. Az euklideszi sík görbülete nulla, a gömb- és elliptikus felületeké pozitív, a Bolyai-Lobacsevszkij geometria felületeié negatív. Mi legyen az ilyen terekkel?

1868-ban az olasz Eugenio Beltrami (1835-1900) leírta az ilyen *hiperbolikus* geometria modelljét. Rá is hatással volt Riemann nagy műve, és megpróbált elképzelni egy, a Bolyai-Lobacsevszkij tulajdonságokkal bíró teret. Ezt a felületet, amelynek tehát mindenhol *negatív* a görbülete, *pszeudogömbnek* nevezte el. Tulajdonképpen egy kifordított gömbről van szó. A (háromdimenziós) pszeudogömböt egy traktrix forgatásával nyerjük (lásd az ábrát).

Világegyetemünk négydimenziós geometriája az említett három modell egyikének általánosítása. De vajon melyiké?

Ha egy traktrixot
elforgatunk 360° -kal,
a jobb oldalon
található pszeudo-
gömböt kapjuk.



Riemann hihetetlen zsenialitásának és megérzéseinek megvolt a maga ára. Mivel ennyire sok mindenre volt képes, a nagy Gauss nem hagyta békén, és az egész matematikai – és fizikai – világ hálás lehet neki azért, amit a nagy nyomás alatt létrehozott. De ha egy olyan embert tesznek ki ekkora nyomásnak, akinek egyébként is hajlama van a túlteljesítésre, és ha egy ilyen ember még beteges is, az előbb-utóbb összeomlik. Betegségén az sem segített, hogy *Habilitationschrift*-jét, amelynek a címe *Über die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen* (Azokról a feltevésekről, amelyeken a geometria alapul) volt, rendkívül kedvezően fogadták. Riemann azt írta apjának, hogy belebetegedett a különlegesen nehéz kutatásokba, amelyeket a székfoglaló előadás érdekében, és a matematikai fizika, illetve a függvényelmélet terén folytatott. Utána hetekig nem tudott dolgozni, amíg az időjárás jobbra nem fordult. Gyógyulása érdekében kibérelt egy kertes házat, és arra törekedett, hogy minél több időt töltsön a szabad levegőn – menekült a rossz

levegőjű szobákból, ahol azelőtt órákig ült munkával bezárkózva.

A székfoglaló előadás tudományos rangot is adott Riemannnak. Ennek az volt az első jele, hogy előadásaira nyolc hallgató járt a megszokott három vagy négy helyett. Mivel a diákok fizették, ez a változás a fizetésén is meglátszott. Riemann 1857-ben, harmincegy éves korában az egyetem tanársegédje lett. Csak két év kellett, és már elfoglalhatta Gaussnak az egyetemi hierarchiában elfoglalt, igen tekintélyes helyét. (Gauss néhány évvel korábban halt meg, a köztes időszakban a pozíció Dirichleté volt.) Jól mutatja, hogy Riemannnt mennyire megbecsülték kollégái és az egész matematikai világ, hogy ilyen fiatalon Gauss göttingai helyére választották.

Egészsége viszont egyre romlott, és 1862-ben ismét megbetegedett. Súlyos tüdőbeteg volt, és a gyógyulás reményében Olaszországba utazott a német kormány költségére. A következő éveket azzal töltötte, hogy oda-vissza utazott Göttingen és a különböző olasz városok között. Göttingenbe érkezve hamarosan újra megbetegedett, Olaszországban újra jobban lett. A pisai egyetem ismerve a helyzetet, tanári állást ajánlott fel neki. Riemann visszautasította, és újra és újra megpróbált visszatérni a göttingeni egyetem tudományos életébe. Állapota gyorsan romlott. Tüdőbajban halt meg harminckilenc éves korában, 1866 júliusában az észak-olaszországi Lago Maggiore-nél lévő villában.

8. Berlin: a téregyenlet

„Kétféle fizikus volt Berlinben: Einstein, illetve a többiek”
*Rudolf Ladenburg, a „többiek” egyike*²⁶

1913. július 3-án a berlini Porosz Akadémia huszonegy:egy arányban megszavazta Einstein felvételét. 1914. április 6-án a tudós és családja Berlinbe költözött.

Einstein, miután különvált Milevától, a Berlin délnyugati részén lévő alsó középosztálybeli Wilmersdorfba költözött. Legénylakásának címe Wittelsbacherstrasse 13. volt. Ez egy csendes, fákkal szegélyezett utca egyik, semmi építészeti szenzációval nem dicsekvő többemeletes épülete volt. Ma a környék vegyes abban az értelemben, hogy egyaránt élnek itt tősgyökeres berliniek és külföldiek. A legtöbb erkélyt muskátlicserepek díszítik, és az autók között több a kicsi, régi és olcsó japán autó, mint a Mercedes és a BMW – nem úgy, mint Berlin más részeiben. Az épületen semmi nem utal arra, hogy a huszadik század legnagyobb fizikusa egyszer itt dolgozta ki a fantasztikus általános relativitáselméletet egy szerény, emeleti lakásban.

A lakástól egy húszperces séta északkeleti irányba a divatos Kurfürstendammra vezet, amelyet a berliniek kedveskedve Ku’dammnak neveznek. Itt, egy széles és forgalmas út mentén sokféle üzlet és divatos kávéház volt akkor, és van még ma is. Ha még keletebbre megyünk, a Ku’dammon túl, meglátjuk az

²⁶ Philipp Frank, *Einstein: Élete és kora (Einstein: His Life and Times)*, New York: Knopf, 1953, 110. oldal.

Állatkertet, Európa egyik legnagyobb, a város központjában levő parkját. Amikor Einstein békére és magányra vágyott, kijött ide, és a magas tölgyfák alatt sétált, vagy leült egy fűzfa alá, és nézte a sima vízben úszó kacsákat, és hallgatta a sokféle énekesmadarat – és gondolkodott. Órákon keresztül tudott úgy sétálni az Állatkertben, hogy szinte nem is találkozott másokkal. A park helyén régen a királyi vadaspark helyezkedett el, ahol az állatok szabadon kószálhattak (amíg le nem lőtték Őket az uralkodó kedvére).

Ha Einstein tovább sétált kelet felé, egy óra múlva Berlin központjában, a Mittén találta magát, ahol egy tekintélyes, szürke kőépületben dolgozott: a Preussische Akademie der Wissenschaftenben, az Unter den Linden 8-as szám alatt, Berlin legelőkelőbb utcájában. Az impozáns épületben van egy belső udvar is, közepén szökőkút, körülötte padok. Jobb oldalon egy dísz tábla emlékezik meg Einstein tizenhét évi itt-tartózkodásáról. A négyzet alakú belső udvar belsejében borostyán kúszik a falra. Ma az épületben a Berlini Állami Könyvtárat és a Porosz Könyvtárat találjuk.

A legközelebbi kávéház az akadémiától két háztömbnyire, nyugatra található az Unter den Linden úton, a Brandenburgi kapu felé. A kávéház neve: Café Einstein. De amikor egy pincért megkérdeztem a név eredetéről, azt mondta, hogy a névnek semmi köze nincsen a fizikushoz. Erős tájszólásban beszélt, és kifejtette, hogy „Einstein” egyszerűen csak „ein Stein”, vagyis: egy kő. „Tudja, a tulaj aszonta, hogy régen csak egy kő vót itten, oszt abból építette a kávéházat.” Az akadémiai épület másik oldalán lévő ház a Humboldt Egyetemé. Itt egy nagy, díszes tábla hirdeti, hogy Max Planck ebben az épületben dolgozta ki a róla elnevezett kvantumelméletet; ennek szimbóluma, a h is látható a táblán.

A hírnévvel együtt járt a jómód is, és miután Einstein feleségül vette Elsát, a házaspár új lakásba költözött, Wilmersdorftól keletre, a város központjához közelebb, egy

stabil középosztály lakta környékre, a Haberlandstrasse 5-ös számú házába. Ma már egy másik épület áll a magas ház helyén, és semmi nem utal arra, hogy Einstein valaha itt lakott. Az utca másik oldalán egy tábla mutatja, hogy hol lakott Rudolf Breitscheid, egy porosz miniszter 1932-1933-ban. Einstein régi háza mellett egy utcai tábla megemlékezik arról, amikor 1942-ben megszüntették a zsidók áram- és vízellátását, és elkobozták vagyonukat. Egyébként Berlinben, ahol mostanában mindent újjáépítenek, úgy látszik, szívesebben emlékeznek meg a kommunizmus felett aratott győzelemről, mint bármi másról.

Einstein lassan tért magához a csalódás után, amely akkor érte, amikor Freundlich sikertelen krími expedíciója nem tudta bebizonyítani elméletét. Mivel már nem kellett fotólemezekkel és csillagászati kérdésekkel foglalkoznia, visszatérhetett ahhoz, amihez a legjobban értett: az elméleti fizikához. Történelmi távlatból ez nagyon jó döntésnek bizonyult. 1914-ben az általános relativitáselmélet még egyáltalán nem volt készen. Így, mialatt a világháború dühöngött Európában, Einstein békésen kutatót tovább. Politikailag nem is lehetett volna rosszabb helyen. Berlint ebben az időben a gyűlölködés, a háborús uszítás, és a kibontakozófélben lévő zsidóellenesség és intolerancia jellemezte. Később Einstein úgy emlékezett vissza, hogy élete első antiszemizmussal kapcsolatos élményét nem a katolikus iskolában élte át, ahol egyébként ő volt az egyetlen zsidó, nem a gimnáziumban, nem is Prágában, hanem Berlinben. Ma már tudjuk, hogy ez csak a kezdete volt annak a folyamatnak, amelybe a német főváros egyre mélyebbre süllyedt. Ezzel együtt Einstein még mindig egészen békés és feltűnően termékeny életet élt a háború alatt a városban, és végre tökéletesíthette csodálatos elméletét.

De a politika és háború ellenére – intellektuális szempontból nem is élhetett volna jobb helyen. Berlini évei során a kor legnagyobb koponyái közül sokan tartoztak a berlini fizika

tanszék állományába. Itt volt Planck és Nernst, a német tudomány „ikertitánjai”; Max von Laue, a röntgensugár diffrakciójának felfedezője; James Frank és Gustav Hertz, akik rájöttek, hogy a nagysebességű elektronok becsapódása különböző színű fényt hoz létre és Lise Meitner, egy bécsi fizikus, aki fontos dolgokat fedezett fel a radioaktivitással kapcsolatban, és aki Einstein szerint még Madame Curie-nél is többet tett a tudomány e területén. Ehhez a kivételes tudóscsoporthoz csatlakozott még egy osztrák, a kvantummechanika felfedezője, Erwin Schrödinger.

Ez lehetett az az ok, amely miatt Einstein, aki bizalmatlan volt mindennel szemben, ami porosz, aki észlelte az intoleráns és zsidóellenes megnyilvánulásokat és a háborús helyzetet, mégis szívesen maradt Berlinben: a tudományos élet virágzása. A fizika tanszék tagjai hetenként megbeszélték a felvetődő érdekes kutatási témákat, és Einstein majdnem minden ilyen Összejövetelen részt vett. Gyakran tett fel gondolatébresztő kérdéseket és vett részt mások kutatásában – és mindezt szerényen. Ez Berlinben akkor is így maradt, amikor már nemzetközi hírességnek számított. Barátságos viselkedése, jellegzetes könnyed nevetése és jó természete ellenére többek szerint meglehetősen zárkózott volt.

– Kényelmetlenül érzem magam ezek között a hűvös, szőke emberek között; nem értik meg mások lelkét – mondta egyszer egy barátjának.²⁷ De könnyű megérteni a viselkedését: az általános relativitáselmélet kidolgozásának végső, nehéz szakaszába érkezett, minden idejét a nagy feladatnak kellett szentelnie, társadalmi kötelezettségeit a minimális szintre csökkentve.

Ebben az utolsó szakaszban, amely végül az anyag és a gravitáció nagy rejtélyének megoldásához vezetett, Einstein egy hónap alatt rengeteg korábbi tévedésére jött rá. Ez a

²⁷ Philipp Frank, *Einstein: Élete és kora (Einstein: His Life and Times)*, New York: Knopf, 1957, 113. oldal.

hihetetlen hónap 1915 novembere volt. Ki kellett javítania azokat a hibákat, amelyeket Grossmann-nal együtt követtek el 1913-ban. Általánosítania kellett azokat az elméleteket, amelyeket A. Fokkerrel, az ETH doktorjelöltjével közösen dolgoztak ki. 1915 júliusától októberéig Einsteint a korábbi munkáiban most észrevett súlyos korlátok foglalkoztatták.

A gravitáció általános relativisztikus elméletét célzó egyenletek, amelyeket kidolgozott, nem teljesültek egyenletesen forgó mozgás esetében, pedig erre általános fizikai megfontolások alapján is szükség lett volna. A fizikai törvényeknek akkor is érvényben kell maradniuk, ha a koordináta-rendszer megváltozik, ezért egy forgó rendszerben ugyanazok a törvények érvényesek, mint egy nyugalomban lévőben. A második probléma az volt, hogy az egyenletek alapján számított precesszió (a forgástengely dőlésszöge) értéke nem egyezett meg a Merkúr bolygó perihéliumán (a Naphoz legközelebbi pontján) megfigyelttel. A harmadik problémát az okozta, hogy az elmélet egyik technikai részletét (a gravitációs Lagrange-függvény a kinetikus potenciál egyértelműségét) Einstein rosszul bizonyította be. A negyedik probléma, amelyről Einsteinnek nem is volt tudomása, abból adódott, hogy hibásan számította ki a Nap gravitációs tere által okozott fényelgörbülés mértékét – emlékezhetünk, hogy a tényleges szögnek a felét kapta. A fenti problémák mindegyikét megoldotta egyetlen nagy matematikai forgószélben, amikor novemberben a Riemann-féle geometriát kezdte használni.

November 4-én Einstein egy cikket mutatott be a Porosz Akadémián. A cikk témája az általános relativitáselmélet egy újabb verziója volt, amelyben az egyenletek kovariánsak voltak az olyan transzformációkkal, amelyek determinánsának értéke 1. Az elméletnek ez a technikai részlete általánosabb volt, mint amilyeneket a korábbi Einstein-Grossmann, illetve Einstein-Fokker munkák során használt. Beismerte az akadémia tagsága előtt, hogy már nem hisz korábbi egyenletei igazságában, és

hogy egy korábbi bizonyítása nem helytálló. De felismerte azt is, hogy ha olyan egyenleteket akar előállítani, amelyek valóban leírják a gravitáció működését, nagyobb fokú általánosságra kell törekednie. Ezen a ponton a két évvel korábban, Grossmann-nal együtt végzett kutatás már nem tűnt nagy lépésnek. Még egy nagy fizikai ugrásra volt szükség a természeti törvények elméleti leírásának terén, és egy ezzel lépést tartó nagy matematikai ugrásra is, amely egy, az addig ismertnél jóval bonyolultabb matematikai eszköztárat kívánt meg. Szükség volt a teljes Riemann-féle geometriára és az olasz matematikusok: Ricci, Levi-Civita és Luigi Bianchi (1856-1928) elméleteire. Az utóbbi olyan tenzorokat dolgozott ki, amelyek eddig ismeretlenek voltak Einstein számára, ezért újra fel kellett őket fedeznie egy hónapig tartó intenzív munkája melléktermékeként.

Einsteint összezavarták a látszólag legyőzhetetlen technikai nehézségek. November 11-én, a megoldás lázas keresése során véletlenül egy lépést tett hátrafelé. Az egyik egyenlethez túlságosan szigorú feltételeket szabott meg, és ezzel pontosan ahhoz az egyenlethez jutott, amelyet egy héttel hamarabb már elvetett. Úgy érezte, előlről kell mindent kezdenie.

November 18-án Einstein bevezetett egy „unimoduláris invarianciának” nevezett feltételt, és elvégzett néhány matematikai levezetést, amelyek megcsillantották egy új eredmény reményét. Megdöbbenve és boldogan látta, hogy az új elmélet alapján számított forgástengely-dőlésszög pontosan megegyezik a Merkúr bolygó perihéliumán mérhetővel. Einsteinnek végre bizonyítéka volt elméletének egyik részére. „Néhány napig nem bírtam magammal, annyira boldog és izgatott voltam” – írta Ehrenfestnek. Később meg is írta egy cikkben az elméletén alapuló számítást, amellyel meghatározta a Merkúr bolygó perihéliumán mérhető forgástengely-dőlésszöget. A cikkbe belefoglalt egy Freundlich által készített

összeállítást is, amelyben a jelenséggel kapcsolatos mérések szerepeltek.

De bár az általános relativitáselmélet – ebben az utolsó előtti állapotban – megmagyarázott egy fontos, a csillagászoknak régóta fejtörést okozó jelenséget, önmagában még nem volt elég világrengető felfedezés. Ehhez meg kellett volna magyarázni még valamit, amit Einstein már régen szeretett volna: a térgörbületet, amelynek körvonalai mentén a fénysugarak elgörbülnek. És ekkor következett be egy hatalmas elméleti áttörés, pontosan akkor, amikor Einstein megoldotta a perihéliumproblémát. November 18-án Einstein egy fél oldalon kifejtette, hogy a gravitációs mezőt leíró, javított egyenletek egy második felfedezéshez vezettek: a hét évvel ezelőtt már sejtett fényelgörbülési jelenség 1,75 szögmásodperc a Napot éppen súroló fénysugarak esetében, és nem feleannyi. Itt Einstein teljesen kihasználta azt a feltételezést, hogy a tér maga is görbül a gravitációs mező miatt, ahelyett, hogy a newtoni axiómákat alkalmazta volna az anyagtermészetű fény részecskéire, a fotonokra.

Einstein ugyanilyen lázasan dolgozott tovább – immár annak az egyenletnek a közvetlen közelében, amely le fogja írni, hogy a gravitációs mező milyen hatással van a téridőre. Tudta, hogy sok tudóssal kell megküzdenie; a tudományos világ egyik fele szerette volna megelőzni Einsteint a relativitáselmélet kutatásában, a másik fele pedig cáfolni szerette volna eredményeit. A második csoport egyik képviselője Max Abraham (1875-1922) volt, aki filozófiai okok miatt ellenezte a relativitáselméletet, az első Gustav Mie (1868-1957), aki egy másik elméletet dolgozott ki arra, hogy a tömeg és a gravitáció milyen kölcsönhatásban van az elektromágneses jelenségekkel. Ott volt örök vetélytársa, Nordstöm is, akinek az elmélete hasonlított egy kicsit Einsteinéhez, de nem tudta teljesen megmagyarázni a relativitás problémáját, amint ezt a tudománytörténészek később bebizonyították. 1914. augusztus

7-én Einstein egy levélben keserű panaszra fakadt ellenfelei és elméleteik ellen. „A Nordstörn-féle gravitációelmétről, amelyben nem foglalkozik a fénysugarak fokozatos szélesedésével, messziről látszik, hogy az *a priori* négydimenziós euklideszi téren alapul, és ezt én szinte már babonának tekintem. Nemrég Mie sértő támadást intézett elméletem ellen, amelyből világosan látszottak a korábbi szempontok. Boldog vagyok, hogy a kollégák foglalkoznak az elméletemmel, még akkor is, ha csak azért teszik, mert meg szeretnék cáfolni.”

Einstein egy évvel később tudtán kívül még egy vetélytársat talált magának: egy tehetséges matematikust, akivel kitűnő viszonyban volt. Ez a tudós a híres David Hilbert (1862-1943) volt. November 7-én Einstein egy levélben elküldte Hilbertnek annak a cikkének a bizonyítását, amelyben végül, a korábbi hibák felismerése után, levezette a gravitációs egyenleteket.²⁸ Később munka közben is elküldte a levezetéseit Hilbertnek, és tudjuk, hogy az utóbbi jelen volt egy előadáson, amelyet Einstein tartott folyamatban lévő általános relativitáselméleti kutatásairól Göttingenben, ahol Hilbert matematikaprofesszor volt. Később Hilbert gratulált Einsteinnek a perihélium-eltolódási probléma okának kiderítéséhez. Miután találkozott Einsteinnel, aki elmagyarázta neki kutatási eredményeit, Hilbert megjelentetett egy cikket Göttingenben, amelyben olyan egyenletek szerepeltek, amelyek gyanúsan hasonlítottak Einsteinéihez. Nyolcvan évvel később egy tudományos bizottság egyértelműen tisztázta mindkettőjüket az alól a gyanú alól, hogy esetleg saját eredményükként próbálták beállítani a másik munkáját. Hilbert egyenletei ebből a távlatból nem többek, mint egy érdekes lábjegyzet Einstein gravitációs téregyenleteihez, hiszen Einstein levezetése ellentmondásmentes, teljes és teljesen helyes volt. Hilbert

²⁸ Abraham Pais, „*Titokzatos az Úristen...*” (*Subtle is the Lord...*), New York: Oxford University Press, 1982, 259. oldal.

munkája a nagy einsteini műnek csak egy kis részét dolgozta ki.

Hilbert azt írta 1917-ben, hogy göttingai munkájához sokban hozzájárult Emmy Nöther (1882-1935), aki azután is munkatársa maradt, miután megjelentek az általános relativitáselméleti eredmények. Nöther munkáira Einstein is támaszkodott; az utóbbi így dicsőítette a tudóst halála után, 1935-ben: „Mértékadó matematikus kortársaink szerint Nöther kisasszony volt a legjelentősebb kreatív matematikai lángész, amióta nők vannak a felsőoktatásban.”²⁹

Einsteinnek jó oka volt rá, hogy Emmy Nöthert ilyen ragyogó jelzőkkel illesse, mert ő alkotta meg azt a tételt, amely lehetővé teszi két fontos következtetés levonását Einstein téregyenleteiből. Az első a T energia-impulzus megmaradási tétele. Ez a téregyenlet kívánatos fizikai tulajdonsága, de Einstein először nem a megfelelő matematikai koordináta feltételezésével próbálta bizonyítani. A második következmény neve: összevont Bianchi-azonosságok. Ezek fontos technikai feltételeket tartalmaznak, amelyeket a görbületi tenzor elégít ki. Az azonosságok lehetővé teszik az általános kovariancia megtartását; a görbület miatt a fizikai törvények változatlanul megmaradnak mozgó koordináta-rendszer esetében is. Bár Einstein egyedül is levezette a Ricci-tenzor és a g metrikus tenzor közötti összefüggést, ezt már előtte többen is megtették. A német Aurel Voss (1845-1931) 1880-as bizonyítására abban az időben nem figyeltek fel, így azt újra felfedezhette az olasz Luigi Bianchi (1856-1928). Mindkét eredmény Nöther tágabb tételének következménye. Érdekes, hogy Emmy Nöther – az első esetben közvetlenül, a másodikban közvetve – így segítségére volt mindkét vetélytársnak: Einsteinnek és Hilbertnek az általános relativitáselmélet egyenleteiért folyó versenyben.

²⁹ Ugyanott., 276. oldal.

1997-ben L. Corry, J. Renn és J. Stachel kutatásai vetettek véget a vitának, amely arról folyt, hogy ki fedezte fel először a téregyenletet. „Kései döntés a Hilbert-Einstein elsőbbségi vitában” (Belated Decision in the Hilbert-Einstein Priority Dispute, *Science*, 278. kötet, 1997. november 14.) című cikkükben a szerzők beszámolnak az archívumokban tett kutatásaik eredményeképpen megtalált – eddig figyelmen kívül maradt – korrektúráról, amely Hilbert egyik kéziratának volt az előzménye, amelyet a göttingai tudományos társaság folyóiratának küldött, és amely 1915. december 16-án érkezett oda. A kézirat kizárja annak lehetőségét, hogy Einstein plagizálta volna Hilbertet, és megerősíti, hogy Einstein helyesen vezette le az egyenletet, amely Hilbert levezetéséből nem is következett volna, amíg Einstein munkája meg nem jelent. A korrektúrapéldányban Hilbert azt állítja, hogy egyenlete nem általánosan kovariáns, amilyennek a relativitással összefüggő gravitációs probléma helyes leírásának pedig lennie kellene.

Einstein téregyenletének tíz komponense van. Azért pontosan ennyi, mert a négy téridőváltozó ennyiféleképpen hozható egymással kapcsolatba, ha nem számítjuk a szimmetrikus kifejezéseket ($4 \times 4 - 6 = 10$). Hilbert ezzel szemben tizennégy összetevőt használt gravitációs egyenletében, és ezek közül az Einsteinnél nem szereplő négy nem kovariáns, mint azt maga is elismerte. Hilbertnek azért volt szüksége négygyel több összetevőre, mert csak így tudta garantálni egyenlete kauzalitását. Így viszont elveszítette a kovariancia lehetőségét – vagyis egyenletében megmaradt a koordináta-rendszertől való nemkívánatos függőség – és egy jó fizikai törvény nem ilyen. Einsteinnél viszont sikerült elérnie ezt a célt a mindössze tíz komponenssel. Amikor Einstein cikke megjelent, Hilbert azt állította, hogy semmi különös számítás nem kell egy tíz részből álló, teljesen kovariáns egyenlethez. Később visszavonta ezt az állítást, és beismerte, hogy Einstein műve elsőrendű fontosságú.

Volt egy matematikai trükk, amelyet a fizikus Einstein ismert, minden idők legnagyobb matematikusa, Hilbert viszont nem. Ez pedig egy fontos tenzor, a Ricci-tenzor speciális esete volt, amelyet Einstein az egyenletbe foglalt. Hilbert ezt csak akkor vette észre, amikor *már ismerte* Einstein levezetését, amelyet elkért, még mielőtt az megjelent volna. Így, bár Hilbert cikke Einsteiné előtt jelent meg, már tudjuk, hogy az eredeti kézirat hibás volt, és csak akkor javította ki, amikor már látta Einstein teljesen helytálló cikkét. Érthető, hogy Einstein nagyon megharagudott, amikor a plágiumot olyan kollégája követte el, akiben teljesen megbízott. Haragja később lecsillapodott, és 1915. december 20-án ezt írta Hilbertnek:

„Volt közöttünk egy bizonyos nézeteltérés, amelynek okát már nem szeretném tovább elemezni. Leküzdöttem a bennem lévő keserőséget, amelyet ez okozott. Immár nem csökkenő barátsággal gondolok Önre, és remélem, Ön is rám.” A Corry Renn és Stachel által írt cikk után a kérdés végre eldőlt. Az általános relativitáselmélet Einsteiné, és ezt többé senki nem vitathatja.

A tudománytörténészek lehetetlennek tűnő feladattal szembesültek, amikor megpróbálták rekonstruálni, hogyan fedezhette fel Einstein az általános relativitáselméletet. John Stachel és kollégái néhány éve az *Albert Einstein összegyűjtött cikkei* (The Collected Papers of Albert Einstein) című, sokkötetes munka összeállításán dolgoznak. Munkájuk során találtak egy jegyzetfüzetet, benne Einstein 1912 nyara és 1913 tavasza közötti kézírásos feljegyzéseivel (ez zürichi tartózkodásának idejére esik). 1984-ben Stachel munkatársa, John Norton írt egy cikket – a zürichi jegyzetfüzet alapján – amely több tévhitet is eloszlatott azzal kapcsolatban, hogy Einsteinnek milyen göröngyös utat kellett megtennie az általános relativitáselmélet felfedezéséhez. A jegyzetfüzetnek

ugyanakkor olyan részei is maradtak, amelyeket a kutatók még ma sem értenek. 1997-ben Jürgen Renn és Tilman Sauer hozzáláttak a zürichi jegyzetfüzet módszeres elemzéséhez. A füzet címlapján a „Relativität” szó látható. 84 oldalas, és rövid jegyzeteket, egyenleteket, és kevés vagy semennyi magyarázattal kísért számításokat tartalmaz. Az elemzés tehát csak akkor vezethetett sikerre, ha olyanok végzik, akik teljes mértékben tisztában vannak az egyenletek alapjául szolgáló matematikai és fizikai fogalmakkal. A kutatók egyenként vizsgálták Einstein jegyzeteit és megpróbálták rekonstruálni a gondolatmenetét. Az elemzés váratlan eredménnyel zárult: 1912-ben Albert Einstein már megközelítőleg leírta végső gravitációs téregyenletét, amelyet teljesen csak három évvel később tudott levezetni. Hogyan lehetséges ez?

Nem tudni biztosan, mik voltak Einstein korai lépései. A Riemann-féle távolsággal kezdi, de a jelölést még nem szokta meg, és nagy „G” betűvel jelöli a metrikus tenzort, majd a füzet későbbi részében áttér a hagyományos kisbetűs „g” jelölésre. Utána különböző egyenletekkel és matematikai átalakításokkal próbálja meg egy rendszerbe hozni a metrikus tenzort, a gravitációs elemeket és a négydimenziós speciális relativitáselmélet elemeit. És hirtelen feltűnik a tényleges gravitációs téregyenlet lineáris alakja. De Einstein úgy gondolhatta, hogy az egyenlet hibás – zavarba ejthette néhány kifejezés, amely nem elégítette ki a követelményeket. Feladta, és a következő években egyik zsákutcából a másikba jutott. 1915-ben, valószínűleg mit sem sejtve arról, hogy az egyenlet már három éve megvan, újra levezette – most más teljes alakjában, minden követelménynek megfelelően.

Einstein levezetésében a Riemann-féle metrikus tenzort használta – a görbült térben értelmezett távolságot, amelyet $g_{\mu\nu}$ -vel jelölt. Egyenleteiben szerepelt egy energia-impulzus tenzor, T , a téridő görbületét kezelő Ricci-tenzor, R , Newton gravitációs állandója, G , és a 8 és π számok. Mivel minden

egyes tenzor több elemből áll, tulajdonképpen több egyenletről van itt szó. Einstein rájött, hogy ha a tenzorok egyes elemei helyett magukat a tenzorokat használja, elég lesz *egyetlen*, matematikailag tömör és elegáns egyenlet. Ezekkel a tenzorokkal és skalárokkal (tehát számokkal, nem tenzorokkal, mint például a 8 vagy a π) játszadozott fejben és papíron, de a feje még mindig tele volt a Merkúr perihéliuma eltérésének sikeres magyarázatával. Az utolsó lépést tulajdonképpen egyetlen, intenzív munkával töltött hét alatt tette meg. 1915. november 25-ére Einstein előtt volt a végső egyenlet, amely leírja a tér, idő, és a gravitációból adódó görbület összefüggéseit, és ennek következményeit. Ezt írta:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi G T_{\mu\nu}.$$

1916. március 20-án Einstein egy cikket küldött az *Annalen der Physik* folyóiratnak, amelyben benne volt a teljes általános relativitáselmélet módszeres levezetése és ismertetése.

Még ebben az évben tovább bővítette a cikket, és ez lett az első könyve.

Egy egyenlet jelek és számok sora, amelyek az egyenlőségjel (=) két oldalán helyezkednek el. Az egyenlet leír egy összefüggést, ami érvényesnek tűnik az egyenletben szereplő mennyiségek között. De egy egyenlet önmagában nem ad megoldást. Az egyenletet *meg kell oldani*. Miután Einstein kitalálta (tenzor)egyenletét, amely különböző, a természet tulajdonságait leíró mennyiségek között állít fel egy kapcsolatot, a következő feladat az egyenlet megoldása volt. Tulajdonképpen Einstein kihívta a tudományos világot: „Oldjátok meg az egyenletemet, és megtudtok valamit a természeti törvényekről.” A téregyenlet akkor lesz megoldva, ha valaki talál olyan *metrikát*, amely kielégíti az egyenletet. Úgy kellett tehát meghatározni a Riemann-metrika ds^2 mennyiségét, hogy az alkalmas legyen az egyenlet szerinti bármely helyzetre.

Ha már megvan a világvonalelemnek is nevezett ds^2 , akkor ezzel megvan az *alak* is, vagyis annak a speciális esetnek a téridőgörbülete, amelyre az einsteini egyenletet alkalmaztuk. Ismertté válik a görbült tér „egyeneseinek” kinézete, és hogy mi a legrövidebb út az adott tér két pontja között. Ha például egy gömbre alkalmazzuk Einstein egyenletét, akkor a legrövidebb távolság „egyenese” egy főkör lesz; ezzel minden pilóta és kormányos tisztában van. Az egyenlet természetesen alkalmazható bonyolultabb terekben is, ahol már a gravitáció is szerepet játszik, és ilyenkor az is kiderül belőle, hogy a gravitáció hogyan befolyásolja a tér görbülését.

Mai napig tart a folyamat, amelyet Einstein indított el egyenletével, sőt egyre erősödik. Einstein egyenletének megoldásaival hihetetlen jelenségeket fedezhetünk fel. Ilyenek például a gravitációs hullámok, a téridő felgyűrődése, a „keretvonszolás” jelensége, amelynek során a téridő egy nagy tömegű pörgő test körül forog, nem is beszélve a perihéliumproblémáról, a gravitációs vöröseltolódásról és a fénysugarak elgörbüléséről. Einstein egyenletének első megoldása (kivéve saját megoldásait, amelyek elvezették őt a vöröseltolódáshoz, a fényelgörbüléshez, és más, általa felismert jelenségekhez) mégis akkor született, amikor az elmélet még nem volt készen, és ezt egy első világháborús katonának köszönhetjük.

1916. január 16-án Einstein két cikket olvasott fel a Porosz Akadémia előtt. Szerzőjük egy tehetséges német asztrofizikus, Karl Schwarzschild (1873-1916) volt, a Potsdami Csillagvizsgáló igazgatója. Ő oldotta meg elsőként Einstein gravitációs téregyenletét. Schwarzschild egyenlete később elvezetett a fekete lyuk jelenség magyarázatához, és tulajdonképpen ez határozta meg, hogy a gravitációs téregyenletek hogyan befolyásolták később a kozmológia tudományát. Schwarzschild azért nem tudta felolvasni saját dolgozatát az akadémián, mert akkor éppen az első világháború

keleti frontján, egy lövészárokból feküdt. A csatatéren, az oroszokkal szemben állva olvasta Einstein egyenleteit, és megoldotta azokat. A megoldást Einsteinnek küldte el Berlinbe. 1916. május 11-én Schwarzschild belehalt a fronton kapott betegségébe. Einstein június 29-én a Porosz Akadémia előtt felolvasta Schwarzschild nekrológját.

1916. május 5-én Einsteint választották a Német Fizikai Társaság élére, Planck helyére. Berlini kollégái és a világ tudósai előtt ekkor már igen nagy tekintélynek örvendett. Az általános relativitáselmélet törvényeit elméletileg tökéletesen vezette le, és munkája minőségét sokan észrevették. De Einstein ezzel együtt sem érte el azt, amire vágyott: annak kísérleti bizonyítékát, hogy a fény elhajlik a Nap körül. Ez az utolsó lépés még hiányzott ahhoz, hogy az elegáns elméletből az univerzum tényleges törvényeinek leírása váljon. És még három évig várnia kellett. Közben bámulatos termékenységgel dolgozott tovább. Írt egy cikket a gravitációs hullámok jelenségéről. Einstein megoldotta saját egyenletét, és rájött, hogy maga a gravitáció láthatatlan és érezhetetlen hullámokat okoz, amelyek azonban különlegesen érzékeny műszerekkel észlelhetők lennének. A tudósok azóta is sok időt és erőforrást fordítottak a gravitációs hullámok észlelésére tett erőfeszítéseikre. Mivel a műszereink egyre jobbak, és laboratóriumunk már gyakorlatilag maga a világűr is lehet, egyre közelebb vagyunk ehhez a felfedezéshez.

1916 júliusában Einstein visszatért a kvantummechanikai problémákhoz. Néhány hónapon belül három cikket írt erről a területről, az egyik a Planck-törvény új levezetését tartalmazta. Ekkor fordult először elő, hogy a kvantummechanikai kutatásai során határozott kétségei támadtak. Ezek a kétségek a kvantumelmélet valószínűségi természetéből adódtak, és végigkísérték egész életében. Aggodalmát a következő, gyakran idézett állításban fogalmazta meg: „Soha nem fogom elhinni, hogy Isten kockajátékot játszik a világgal.”

Decemberben Einsteint a császár kinevezte a Császári Fizikai Technikai Intézet igazgatótanácsába. Hitler hatalomra jutásáig megtartotta ezt a tisztséget.

9. *A Principe-sziget, 1919*

„A *Times*-ban rólam és körülményeimről megjelent leírás a szerző nagy képzelőerejéről tanúskodik. Úgy látszik, a relativitáselmélet alkalmazható az olvasói ízlésre is: míg Németországban német tudósnek számítok, Angliában, úgy látszik, svájci zsidónak. Ha valaki ‘bête noire’-nak (fekete báránynak) nevezne, a leírás megfordulna, és a németek szemében svájci zsidó, az angolok szemében német lennék.”

*Albert Einstein a londoni Timesnak írt levelében,
1919. november 28.*

A háború nagyon megnehezítette a tudósok közötti kommunikációt. Willem de Sitter (1872-1934) holland asztrofizikus nem sokkal Einstein teljes általános relativitáselméletének megjelenése után szerzett belőle egy példányt. Tudta, hogy a La Manche csatornán túl van egy másik asztrofizikus, aki nagyon szívesen elolvasná Einstein fantasztikus elméletét, és talán ő értené meg a legjobban Einstein remekművének bonyolult részleteit. De hogyan juttassa el hozzá? Tombolt a háború, és egy dokumentum Angliába juttatása nem volt egyszerű feladat. De Sitter egy titkos tervet dolgozott ki, és sikeresen kicsempészte a cikket Londonba, ahol végül célba ért: Arthur Eddington (1882-1944) postaládájába.

Arthur Stanley Eddington 1882. december 20-án született az angliai Westmoreland Kendall nevű városában. Apja, a helyi iskola igazgatója meghalt, amikor a fiú még csak kétéves volt. Az anya és két gyermeke Westonba költözött. Eddingtont már gyermekkorában elbűvölték a nagy számok.³⁰ Egészen kicsi

³⁰ S. Chandrasekhar, *Eddington: Korának legnagyobb asztrofizikusa (Eddington: The Most Distinguished Astrophysicist of His Time)*, London: Cambridge University Press, 1975.

korában már tudta a nagy szorzótáblát, 24 x 24-ig. A nagy számok szeretete is közrejátszhatott abban, hogy a csillagászatot választotta életcéljául. Előadásai közben gyakran írt nagy számokat a táblára, és mindig kiírta az összes számjegyet (a tudományos életben inkább a 10 hatványain alapuló normálalak a szokásos). Életrajzírója, Chandrasekhar feljegyezte, hogy egy 1926-os oxfordi előadása során Eddington felírta a táblára a Nap becsült tömegét tonnában kifejezve: 2 000 000 000 000 000 000 000 000 000.

Eddington a manchesteri Owen's College-be járt. 1903-ban végzett, és Cambridge-ben doktorált. 1907-ben megkapta a Smith-díjat, és tagja lett a Trinity College társaságának. Ugyanebben az évben már a greenwichi csillagvizsgáló munkatársa Sir William Christie királyi csillagász meghívására. 1912-ben bevásztották a cambridge-i egyetem Plume tanszékére, 1914-ben a cambridge-i csillagvizsgáló igazgatója lett. Mindkét pozícióját megtartotta az ezt követő harminc éven át. Amint megkapta Einstein cikkét, az teljesen elvarázsolta. Olyan nyelven íródott, amelyet jól ismert.

A semleges Svájcból Einstein svájci csatornákon keresztül küldte Angliába dolgozatának példányait, azonban a de Sitter által Eddingtonnak küldött volt az egyetlen, amely a háború végéig Angliába ért. Mellesleg szólva de Sitter Eddingtonnak és a Királyi Csillagászati Társaságnak elküldte három, saját relativitáselméleti cikkét is. Egyik kozmológiai cikkének döntő hatása lesz Einstein kozmológiai munkásságára, és meghatározza a következő évtizedek kozmológiai irányvonalát is. Eddington mindent megtett, hogy elterjessze Einstein nagyszerű elméletét Angliában és az Egyesült Államokban.

Eddington írt egy *Beszámoló a gravitáció relativitáselméletéről* (*Report on the Relativity Theory of Gravitation*) című cikket, amely 1918-ban jelent meg Londonban, és Nyugaton széles körben elterjedt. Eddington a relativitáselmélet lelkes követője lett. Tehetséges elméleti

ember lévén azonnal felismerte, hogy az elmélet elegáns és logikailag megalapozott. Eddington, a csillagász, nem is igényelte volna a természeti törvények e gyönyörű egyenleteinek kísérleti bizonyítékát. Számára az egyenletnek önmagában is értéke volt. Furcsa módon éppen ő, Arthur Eddington, az általános relativitáselmélet igazának feltétlen híve bizonyította be később mérésekkel az elméletet. A bizonyítási ötlet különös véletlenek sorozatából adódott a háború által gyötört Angliában.

Eddington kvéker volt, és így, Einsteinhez hasonlóan, pacifista. 1917-ben Angliában még több katonára volt szükség, és ezért felemelték a katonai szolgálati kötelezettség felső korhatárát 35 évre. Eddington ekkor 34 éves volt, és tudta, hogy be fogják sorozni, de arra készült, hogy lelkiismereti okból megtagadja a bevonulást. Ez nehéz helyzet elé állította a Trinity College professzorait. Ha Eddington megtagadja a bevonulást, valószínűleg letartóztatják, és csatlakozhat kvéker barátaihoz, akik a háború egész ideje alatt krumplit pucolnak egy észak-angliai internálótáborban. Ez nagy szégyen lenne az egyetemre, a csillagvizsgálóra és az egész brit tudományos életre. Valamit tenni kellett, méghozzá gyorsan, mielőtt még behívnák Eddingtont.

Azok a brit csillagászok és fizikusok, akik Einstein cikkéről Eddingtonon keresztül szereztek tudomást, tudták, hogy egy napfogyatkozás során lehetőség nyílik az elmélet kísérleti igazolására, mert ilyenkor a fényelgörbülés észlelhetővé válhat – emlékezzünk, hogy Freundlich éppen ezzel próbálkozott a háború elején. 1917 márciusában az akkori királyi csillagász, Sir Frank Dyson felhívta a tudósok figyelmét, hogy 1919. május 29-én teljes napfogyatkozás várható. A napfogyatkozás Európából nem látható, de az Atlanti-óceán egy sávjában igen. Ebbe a sávba tartozik Brazília egy része, és a nyugat-afrikai part közelében lévő trópusi sziget, Principe is. Dyson azt is megjegyezte, hogy a csillagok állása miatt a napfogyatkozás

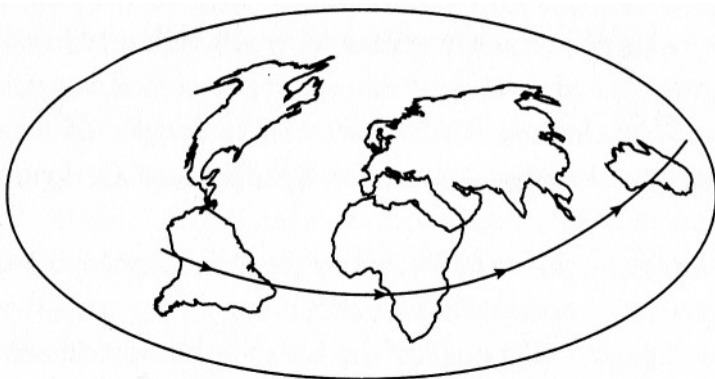
most különlegesen kedvező lesz a Nap széle melletti csillagfény elgörbülésének észlelésére. A napfogyatkozás során a Nap és a Hold éppen a Bika csillagkép homlokát alkotó, sűrűn elhelyezkedő csillagcsoport, a Hyadok (Fiastyúk, Süldők) közepén helyezkedne el. Úgy gondolta, kár lenne veszni hagyni egy ilyen kitűnő lehetőséget.

A világ azonban háborúban állt, és nem volt egyszerű egy angol expedíciót küldeni Egyenlítői-Afrikába vagy Brazíliába. Még ha a háborúnak addigra vége is lesz, egy ilyen expedíció nem elhanyagolható kockázattal és nehézséggel járna. Ugyanakkor a terv felkeltette az ember kalandvágyát is – egy expedíció elindítása egy távoli és valószínűleg veszélyes helyre, bizonytalan időkben, tudásvágyból. Dysont nem hagyta nyugodni a lehetőség. És még mindig ott volt a másik megoldandó probléma: Eddington és a hadsereg. Dyson egy igazi diplomatához illő tervet eszelt ki – olyat, amely megoldja mindkét gondot.

Dyson királyi csillagászként jó kapcsolatban volt a Brit Tengerészettel. Szokatlan kéréssel fordult hozzájuk. Először elmagyarázta nekik, hogy az („ellenséges” fizikus által kidolgozott – ugyanis Einsteinnek vissza kellett vennie a német állampolgárságot, amikor Berlinbe költözött) általános relativitáselmélet milyen alapvető fontosságú a tudomány számára, és hogy milyen hihetetlen lehetőség nyílik a napfogyatkozás során az elmélet bizonyítására. Utána elmondta, hogy Arthur Eddington az egyetlen nyugati tudós, aki ezt a bizonyítást el tudná végezni. Valószínű, hogy Dyson hazafias érveket is felhozott a tárgyalás során; Sir Isaac Newton jelképesen megkérdezi *Opticks* című könyvében: „A testek vajon nem hatnak a távoli fényre, és nem görbítik-e el annak sugarait?” Ezek szerint a nagy angol tudós már évszázadokkal ezelőtt szerette volna tudni, hogy a testek vonzzák-e a fényt. Akárhogy is történt, a végeredmény az lett, hogy Dyson megegyezett a tengerészettel és a brit fegyveres erőkkal, hogy

Eddingtonnak a bevonulás helyett egy expedíciót kell előkészítenie a trópusokra, hogy a napfogyatkozás alatt vizsgálja az általános relativitáselméletet. Továbbá, ha a háború a napfogyatkozás ideje előtt (1919. május 19.) érne véget, akkor – hazafias kötelességként, katonai szolgálat helyett – Eddington vezetné az expedíciót. Megegyeztek, és Eddingtont nem hívták be.

1918. november 11-én a fegyverszünettel véget ért az első világháború vérontása. 1919. január 18-án Quai d'Orsay-n elkezdődött a párizsi békekonferencia és a háborúban részt vevő nemzetek képviselői elkezdték tárgyalásaikat. A háborúnak vége volt, és a fénysugár elgörbülését a májusi napfogyatkozás során megmérni készülő expedíció elindulhatott. A tudományos vállalkozáshoz a királyi csillagász pénzügyi támogatást kapott a brit kormánytól, és Eddingtonnal együtt napokig újra és újra végigbeszélték a tervezett expedíció minden részletét. Arthur Eddington később ezt az előkészületi időszakot élete legizgalmasabb periódusaként emlegette. És valóban, hány csillagásznak vagy más tudósnak volt lehetősége egy elhagyatott és titokzatos trópusi szigetre készülődni, miközben a világháború miatt az egész világon még szigorú takarékosagra volt szükség?



Dyson és Eddington a térképek fölött eldöntötte, hogy két csapat megy két különböző helyre, hogy legalább egyiküknél kedvező legyen az időjárás (a napfogyatkozást felhők zavarhatják meg, különösen trópusi vidékeken), és így legalább egy jó fényképet tudjanak készíteni, amelyen látszanak a Nap közelében lévő csillagok. Az 1919. május 19-ei napfogyatkozás pályája délnyugatról északkeletre haladva, átlósan szeli majd át az Atlanti-óceánt. Az egyik helyszín tehát Brazília lesz, a másik az Atlanti-óceán másik partján, Afrika partjai mellett. A csillagászok által talált két legígéretesebb helyszín Sobral volt, Brazília északi részén, az Amazonas vidékén, Ceará államban, és a Principe-sziget az óceán másik partján. A két helyszínre egy-egy csillagvizsgáló csapata indul: Brazíliába a Greenwichi Csillagvizsgálóé, akiket A. C. D. Crommelin vezet majd, Principe-re pedig a Cambridge-i Csillagvizsgálóé, Arthur Eddington vezetésével. A két expedíció együtt hagyta el a liverpooli kikötőt 1919. március 8-án, Őfelsége Anselm nevű hadihajóján, és elindult az észak-atlanti Madeira szigetére, ahol elváltak. A brazil csapat az Anselm fedélzetén maradt, és március 25-én Parába érkezett. Ott választhattak, hogy továbbmennek Sobralba, vagy megvárják az Anselmet, és az visszaútja során elviszi őket, és így néhány hét múlva érkeznek meg. Mivel nem igazán tudták, mi várna rájuk az Amazonas őserdejében, inkább a várakozás mellett döntöttek, amelynek idejét a hajón töltötték. Amikor a hajó visszaért Parába, egy bizonyos Dr. Morize (akinek voltak kapcsolatai és egy kis befolyása a brazil kormánynál) távirata várta őket. A tudós tanácsokat adott az út további részével kapcsolatban, valamint ajánlólevelet egy kormányhivatalnokhoz. Így tudott végül Crommelin és csapata átjutni a helyi vámhivatal útvesztőin – ez azért is volt olyan nagy gond, mert sok, nagy, nehéz csomagjuk volt.

Camocimben a fáradt csillagászokat és technikusokat a helyi hivatalos szervek üdvözltek, és segítségükre voltak, amikor a

málhát vonatra kellett rakodni. Vasúton keltek át az őserdőn Sobralba. Ott az állomáson bennszülöttek sorfala fogadta a vonatot. A helyiek kíváncsian figyelték a gyarmati öltözékben izzadó angol tudósokat, akik különös szerkentyűket pakoltak le a vonatról. A körzet elöljárói és vallási vezetői is megjelentek az idegenek üdvözlésére. Hamarosan csatlakozott hozzájuk Vicente Saboya ezredes, Sobral megbízott vezetője. Üdvözölte a látogatókat, parancsokat kiáltott az angol felszerelés alatt görnyedő helyi hordároknek, és a csapatot a házába invitálta.

Hamarosan megérkeztek a város ácsai, akik fákat döntöttek, fűrészelték, nagy V alakú támaszokat készítettek, amelyeket erős fabakok tartottak. Ezek fogják a távcsövet a megfelelő szögben a horizontra irányítani, úgy, hogy a számított időpontban hét csillag látszódjon majd az eltakart Nap mellett. A távcsövet a Saboya ezredes által kijelölt ház bejárata előtt helyezték el. A sárban kunyhókat és cölöphidat építettek, hogy a csillagászok száraz lábbal közlekedhessenek. Hosszú időt töltöttek a műszerek beállításával és ellenőrzésével. Árkokat ástak, amelyben a távcső fa tartószerkezetét mozgatni lehetett. Erre azért volt szükség, mert a Föld forgása miatt a Nap oldalszöge a napfogyatkozás percei alatt is változik. A csapat egy 5,8 méteres távcsövet használt 40 cm átmérőjű lencsével. A fotólemezek 25 x 20 cm-esek voltak.

A távcső fókuszálásához a csillagászok a fényes vörös Arcturus csillagot használták. Több felvételt is készítettek, miközben a kobaltüveg szemlencse fókuszát a két végpont között fokozatosan változtatták. Utána gondosan megvizsgálták a felvételeket, hogy ki tudja választani, melyik fókuszértéket használják a napfogyatkozás visszahozhatatlan pillanatai során. Amikor ezt meghatározták, szorosan meghúzták a zárgyűrűt, hogy a lencsét a továbbiakban ne lehessen állítani.

A Sobralban tartózkodó angol csapat tevékenysége ezután már csak az időjárás megfigyelésére és elemzésére korlátozódott. Ez volt ugyanis az a tényező, amelytől az egész

expedíció sikere függött. A csapat valószínűleg jól választotta meg a távcső helyét; bár első pillantásra hóbortos ötletnek tűnik egy távcsövet a dzsungel lakott területén egy ház elé helyezni, hiszen tíz km-re északnyugatra, a napfogyatkozás sávjában áll a 800 m magas Meruoca hegy – és nem szokatlan a csillagászati távcsöveket hegytetőre helyezni. De a tudósok szerencsére még időben észrevették, hogy a hegy fölött gyakran gyűlnek össze a felhők, és hogy a hegycsúcs gyakran ködbe burkolózik. Lent, Sobral városában viszont a tudósok és távcsövük többnyire jó időt élveztek.

A hőmérséklet egyenletes volt, a napi hőingadozás a hajnali 5 órai 24 °C-tól a délután 3 órai 36 °C-ig tartott. Érdekes módon a légnyomás is egyenletes volt. Május 25-én, csak négy nappal a napfogyatkozás előtt azonban nagy eső esett. A tudósok nagyon szerették volna tudni, hogy vajon megváltozik-e az idő, vagy ez csak egy múltó vihar volt. Az esőnek tulajdonképpen örültek, hiszen jó volt, hogy a talaj nedvesebb, a levegő pedig kevésbé poros lett. A várakozás hetei alatt mindennap bennszülöttek gyűltek a tábor köré, akik tudomást szereztek arról, hogy az idegenek azért jöttek, hogy megnézzék, amint a Nap elsötétedik, és a nappalból éjszaka lesz. Tényleg megtörténhet egy ilyen rémség? Tisztelettel vegyes rémülettel figyelték, amint a tudósok az égre irányított különös cső körül nyüzsgtek.

Arthur Eddington és csapata a Principe-szigetre indultak, miután Madeira szigetén elhagyták Ófelsége Anselm nevű hadihajóját. Még hetekig a portugál szigeten várták a másik hajót, amely elviszi őket úti céljukhoz. A tudósok Funchal városában lévő szállodájukban mulatták az időt, és meglátogatták a hegyes-völgyes, zöld sziget dús ananászültetvényeit és halászfaluait. „Ha így jobban szolgálhatja hazáját, mintha a lövészárokból várna a bombát, nem is olyan rossz” – gondolhatta Eddington. Április 9-én kikötött a Companhia Nacional de Navegacãohoz tartozó *Portugal*

teherhajó. A brit csapat felszállt, és délre vitorlázott a Principe-szigetre, amely az Egyenlítőtől egy fokra északra fekszik, a nyugat-afrikai Egyenlítői Guinea partjai mellett. Ebben az időben mind Principe, mind a szomszédos Sao Tome sziget portugál gyarmat volt.³¹

1919. április 23-án kora reggel a *Portugal* megérkezett a Principe-szigeti St. Antonio kikötőbe. Amint a hajó a part felé közeledett, az utasok szeme előtt egy trópusi paradicsom képe bontakozott ki. A tengerpartot pálmafák szegélyezték, a homok fehér volt, és a víz színe a türkiztől a mélyzöldig mindenféle gyönyörű színben játszott. (Évtizedekkel később itt forgattak egy híres Bacardi reklámfilm.) A tengerpart mögött a sűrű esőerdővel borított terep emelkedett egészen két vulkáni eredetű hegyig, amelyek csúcsa körül a felhőket bíborszínűre festette a felkelő nap. Ahogyan a hajó közeledett a kikötőhöz, egyre jobban kivehetővé vált a közeli erdőben élő madarak éneke-a szigeten 26 őshonos, és még 126 egyéb madárfaj él. A vízben sok „dongo” csónakot láttak – ezek az „oca” fából készült, nyársorrú hallal, vitorláshallal és barrakudával megrakott kenuk most tértek vissza az éjszakai halászatból. A zsákmány általában olyan gazdag volt, hogy a szigetlakók családok nélküli, kirojtosodott végű kötelekkel húzták ki egyik halat a másik után. A sziget valódi paradicsom volt.

De a Principe-szigeten egy titok is rejtőzött. Nem sokkal ezelőttig, több száz éven keresztül rabszolgatartó gyarmat volt. A rabszolgákat embertelen körülmények között tartották, és a sziget belsején lévő kakaó- és banánültetvényeken dolgoztatták. Több ezer rabszolga belehalt a kemény munkába, az éhezésbe és a különböző betegségekbe. A tizenkilencedik században ez

³¹ A szigetek 1975-ben nyerték el függetlenségüket. A gyarmatosító portugál kormány helyét egy egypárti rendszer vette át, amely jó kapcsolatban volt Kubával, Kínával és a Szovjetunióval. Csak nemrég, a kommunizmus bukása óta van demokratikus kormánya a szigeteknek – ma ez a világ egyik legkisebb független országa.

volt a világ utolsó rabszolgakereskedő helye. Egy másik tengerpartot, amelyet az utasok később láttak, Ostobák partjának nevezték, mert a portugálok úgy gondolták, hogy az itt megtelepedő szökött rabszolgák nem élnek túl. A sziget tele volt a kegyetlen múlt emlékeivel, mérges kígyókkal, és a malária kórokozóival.

Eddington és csapata kiszállt a hajóból, és a helyi rakodómunkások elkezdték a rakomány kipakolását. Portugál gyarmati tisztviselők siettek az angolok üdvözlésére, akik mindannyian támogatásukról biztosították a tudósokat, és felajánlottak minden lehetséges segítséget. Legfőbb támogatójuk Campos Rodrigues altengernagy volt, a Lisszaboni Csillagvizsgáló munkatársa; ő teremtette meg a helyiek és az angolok közötti jó kapcsolatot. A portugál kormány jóindulata jeléül eltekintett a kötelező vámvizsgálatról is, pedig a vendégek igencsak terjedelmes poggyásszal érkeztek.

A csapat az újdonságnak számító négykerék-meghajtású járműveken fésülte át a 16-szor 10 km-es szigetet. Azt a helyet keresték, ahonnan a lehető legjobban meg lehet figyelni a napfogyatkozást. Több kakaóültetvényt is megnéztek a sziget belsején. Ezek portugál tulajdonosai fekete bennszülötteket dolgoztattak. A feketék felszabadított rabszolgák, vagy ezek leszármazottai voltak. Néhány napi őserdei túrázás után Eddington döntött: a megfigyelés helyszíne Roca Sundy lesz, a sziget északnyugati részén, tengerszint felett 150 m magasságban.

A csapat rengeteg csomagját április 28-án szállították Santo Antonióból Sundyba. Az út legnagyobb részét járműveken tették meg, de az utolsó kilométer járhatatlannak bizonyult a nehezebb járművek számára. Így hát ki kellett rakodniuk az erdő sűrűjében, a sáros, moszkítóktól nyüzsgő pocsolyák között, és innen a bennszülöttek a csupasz hátukon vitték a csomagokat. A csapat szállásául kijelölt ház előtt fakerítést

emeltek egy kis földterület köré. Itt helyezték el a távcsövet közvetlenül a hegyoldalra, amelynek a meredeksége éppen olyan volt, hogy a távcső pontosan a Nap felé fog mutatni a napfogyatkozás során. A látványt tehát semmi sem akadályozhatta. Egy heti lázas készülődés után – a helyi ácsok éppen olyan V alakú támaszokat, súlyokat, és egyéb kellékeket készítettek a távcső számára, mint az óceán másik partján, Sobralban – a csapat visszatért Santo Antoniába. Ott töltötték a május 6-ától 13-áig tartó hetet, mert Eddington úgy gondolta, hogy a nedves levegő miatt még túl korai kicsomagolniuk a távcső tükrét. Amikor május 16-án a csapat visszatért Sundyba, megkezdték a távcső és a fotófelszerelés ellenőrzését. Eddington semmit nem bízott a véletlenre. Tudta, hogy május 29-e, a napfogyatkozás napja, élete meghatározó napja lesz.

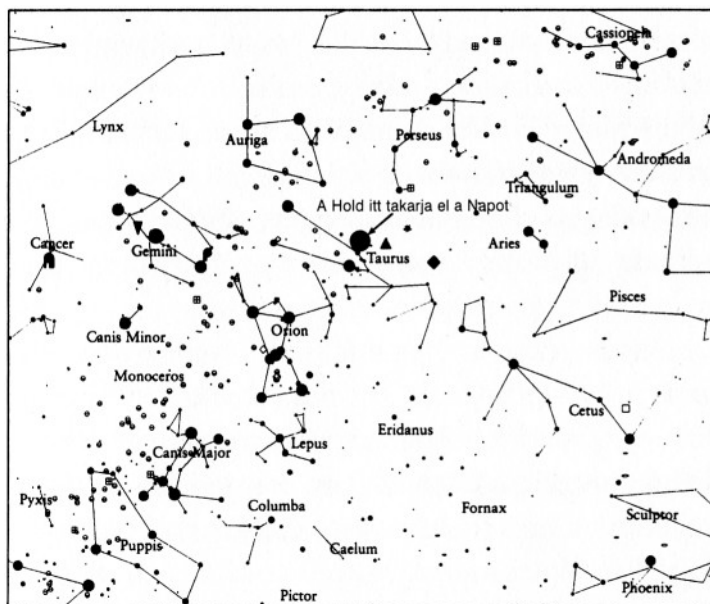
Eddington tehát századszor is végiggondolta a kísérlet lehetséges kimeneteleit – vagyis azokat az eseteket, ha a természet nem avatkozik közbe felhőkkel, vagy más okból bekövetkező rossz látásviszonyokkal. Három lehetőséget képzelt el: 1. Semmit nem találnak – a napfogyatkozás során nem változik meg a csillagok látszólagos helyzete. Ez azt jelenti, hogy a fénysugár nem görbül el. 2. A csillagok helyzete változik – vagyis a fény elhajlik – de a Newton-törvény szerinti mértékben, bizonyítva ezzel a fény részecsketermészetét. 3. A csillagfény az Einstein által jósolt mértékben görbül el. Az első lehetőség szerint nem lenne semmiféle fény-gravitáció kölcsönhatás. A második szerint, ha a fény részecsketermészetű, akkor Newton nyert, tehát Anglia. A harmadik lehetőség szerint pedig nem Newton, hanem Einstein és új, forradalmi fizikai és természeti elképzelései győznek. Eddington tudta, hogy angol honfitársai a második lehetőségben reménykednek. Ő viszont titokban Einsteinnek drukkolt. Beleszeretett a relativitáselméletbe – értette, és számára, csakúgy, mint a több ezer kilométerre lévő Einstein számára (akinek fogalma sem volt a Sobralban és a Principe-

szigeten folyó rendkívüli előkészületekről) egyértelmű volt, hogy Isten *csakis* az általános relativitáselmélet szerint működtetheti a világot. Eddington várta a sorsdöntő napot. Remélte, és imádkozott azért, hogy jó idő legyen.

A napfogyatkozás előtti napok nagyon felhősek voltak. Május 29-ének reggelén 10-től fél 12-ig – ebben az évszakban szokatlan – erős zivatar volt. Utána feltűnt néhány pillanatra a Nap – ez vajon jó jel? Újra gyülekezni kezdtek a felhők. A napfogyatkozás számított időpontja 14:13:05-14:18:07, a greenwichi idő szerint (helyi idő szerint egy órával később). 13:55-kor a napsarló már elő-előtűnt a felhők mögül. Addigra a fény már különlegessé vált, és a megfigyelőkön különös érzés lett úrrá. A legnagyobbbrészt már takarásban lévő Nap fénye áttetszővé kezdett válni. Olyan volt, mintha a tájat szűnyoghálón keresztül nézték volna. A szűnyogháló egyre sűrűbb lett. De a felhők még mindig ott voltak. És akkor, éppen a teljes elsötétedés előtt, a Napot takaró felhők szétváltak. Hirtelen egy hatalmas árnyék közeledett a víz felől, és beborította a nézőket. Megkezdődött a teljes napfogyatkozás. A természet ereje megszédítette a felfelé tekintő megfigyelőket. Még a tapasztalt napfogyatkozás-nézők is meghiúsulnak, amikor ismét alkalmuk van egy újat megtekinteni. A felhők között, amelyek csak annyi időre váltak széjjel, hogy a fotókat el lehessen készíteni, a csillagászok és segítők az égre tekintve a Napot sötét korongnak látták. A korong körül mintha lángolt volna a napudvar fényes gyűrűje, az égi háttér pedig olyan volt, mintha éjszaka lenne – egészen a napfelkeltére emlékeztető halvány, piros horizontig.

Tisztán látszott a Nap melletti csillagmező, és a Principen és Sobralban készült fényképeken összesen tizenhárom csillagot örökítettek meg. Ezek (a Fiastyúk csillagai) között helyezkedett el a viszonylag fényes (4-es magnitúdójú) Kappa Tauri és

Üpszion Tauri csillag, és még tizenegy halványabb csillag.³² Mindez az ábrán látható.



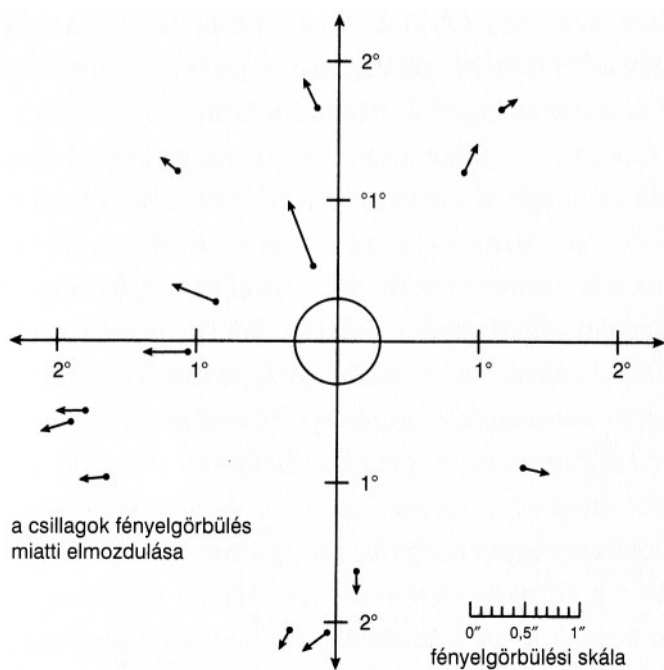
A felvételeket pontosan az előre átgondolt terv szerint készítették, tizenhat lemezre. Cottingham nyújtotta át Eddingtonnak az egyes lemezeket, és működtette a fényképezőgépet. Eddington cserélgette a kazettákat. Közben az Atlanti-óceán másik oldalán a sobrali kutatócsoport kiváló látásviszonyok között fejezte be a munkát. Egyetlen felhő sem adott okot aggodalomra az időjárással kapcsolatban. A csillagászok és a helyi bémészkodók megcsodálták a

³² Egy tudománytörténeti furcsaság miatt a csillagok magnitúdója annál nagyobb, minél kisebb szám jelöli azt; a szám akár negatív is lehet. A Szíriusz, a legfényesebb csillag magnitúdója körülbelül -1. A Vega, a következő legfényesebb, 0 magnitúdójú. A halványabb csillagok 1-es, 2-es stb. értékkel rendelkeznek. Egy 4-es magnitúdójú csillag szabad szemmel már alig észrevehető, de gyenge távcsővel már igen.

különleges látványt, a bennszülöttek egy részét meg is rémítette a soha nem tapasztalt esemény. Itt is ugyanazokat a csillagokat fotózták le, de a lemezeket nem hívták elő. A lemezeket Angliába szállították, és mire megérkeztek, a Principe-szigeti csapat már rég előhívta a sajátjait. A sobrali megfigyelők munkája tehát tulajdonképpen csak Arthur Eddington és társai eredményeinek megerősítésére szolgáltak.

Amikor Eddington és csoportja Principe szigetén előhívta a fotókat, először megijedt – az első tíz lemezen egyetlen csillag sem látszott. A döbbenetes jelenség okozta izgalom miatt, amelyet az esetleges pozitív eredmény történelmi jelentősége is fokozott, nem vették észre, hogy a teljes elsötétedés közben majdnem végig vékony felhőréteg takarta el a Napot és a Holdat. A maradék hat lemez közül azonban kettőn öt-öt csillag látszott, amely már éppen elég volt az eredmény eléréséhez. Néhány hónappal az expedíció előtt Oxfordban ellenőrző felvételek készültek a csillagok akkori helyzetéről, amelyeken ugyanez a csillagmező volt látható, a Fiastyúkkal és a Bika többi csillagával együtt. A módszer hibáinak kiküszöbölésére lefényképezték az égbolt egy másik részét is, a fényes Arcturusszal együtt, csakúgy, mint Sobralban.

A távcső mellett felállított „laboratóriumban” az izgatott Eddington előhívta a lemezeket, és összehasonlította a Fiastyúk csillagmezejéről készült oxfordi és principe-i felvételeket. Az eredmény megdöbbentő volt: a csillagok helyzete átlagosan 1,6 ívmásodperccel tért el (plusz/mínusz 0,3 ívmásodperc). A statisztikai eltéréseken belül ez az eredmény nagyon hasonlított az Einsteni általános relativitáselmélete által kiszámítható fényelgörbüléshez (1,75 ívmásodperc). Gyors, izgatott hangvétellű táviratot küldött Angliába: „Felhős, de ígéretes. Eddington.”



Eddington akkori lelkiállapotát jobban megértjük, ha elolvassuk, hogyan írta le az eseményt hat héttel később, Angliába visszatérve, prózában és versben (később megírta egy könyvben is)³³:

Az árnyékolódoboz minden figyelmünket leköti. Csodálatos a fenti látvány és a felvételek későbbi tanúsága szerint egy gyönyörű lángkilövellés látható a Nap felszíne fölött mintegy százezer mérföldre. Nincs rá idő, hogy elkapjuk a pillanatot. Csak a táj különös félhomálya tudatosul bennünk, és a természet hirtelen elnémulása, amelyet csak a megfigyelők kiáltásai és a metronóm ketyegése tör meg a teljes elsötétedés 302 másodperce alatt.

³³ Sir Arthur Eddington, *Tér, idő és gravitáció: Az általános relativitáselmélet vázlatja* (*Space, Time and Gravitation: An Outline of the General Relativity Theory*), New York: Harper & Row, 1920, utánnyomás: 1959, 115. oldal.

Eddington és a kutatócsoport befejezte a munkát, és elkezdett csomagolni a visszaútra. Eredetileg úgy tervezték, hogy tovább maradnak a felvételeket alaposabban megvizsgálni, de házigazdáiktól rossz híreket kaptak: a gőzhajótársaságot sztrájk fenyegette. Ha nem akartak még hónapokig a szigeten maradni, azonnal indulniuk kellett. A sziget kormányzója szót emelt érdekükben a portugál kormánynál, és hamarosan helyet is kaptak egy zsúfolt, Lisszabonba tartó gőzhajón. A hajó még éppen a sztrájk kezdete előtt, június 12-én hagyta el Principe szigetét. Július 14-ére a csapat Liverpool kikötőjébe érkezett.

Sobralban a csapat még hét héten át az összehasonlításra alkalmas fényképeket készített. Július 18-án kezdték el szétszerelni és becsomagolni a felszerelést, sokkal ráérősebben, mint principe-i társaik. Július 22-én hagyták el Sobralt, és a kényelmesebb utazás érdekében több előkészített csomagot hátrahagytak; ezeket házigazdáik később utánuk küldték. Angliai útjuk hetekig tartott. Számítási eredményeik átlagosan $1,98 (\pm 0,12)$ ívmásodperc fényelgörbülést mutattak. Ezek az eredmények is a statisztikai hibán belül vannak, tehát elfogadhatóak Einstein elméletének bizonyítékául.³⁴

A principe-i expedíció előtt a királyi csillagász elmagyarázta Cottinghamnek, Eddington asszisztensének (aki Eddingtonnal ellentétben nem volt relativitáselmélet-szakértő) a kísérlet fő célját, és annak jelentőségét. Cottingham azt hitte, minél nagyobb eredményt kapnak, annál nagyobb lesz a szenzáció, de szerencsére ezt a feltételezését meg is fogalmazta még az út előtt.

– Mi történne, ha a fényelgörbülés mértékét kétszer annyinak találnánk, mint amire számítunk? – kérdezte.

³⁴ A szignifikanciát 95%-nak véve, a szokásos két standard eltérési szabály szerint.

– Ebben az esetben – válaszolta Dyson, – Eddington valószínűleg megőrülne, és a kollégának egyedül kellene hazajönnie.

De minden jól végződött; még jobban, mint ahogyan azt az optimista Eddington remélte. Einstein elmélete igazolást nyert (a kísérleti hibakorláton belül), és mindenki hazaérkezett. De mi lesz Einsteinnel? Ez, végül is, az ő elmélete. Mikor kapja meg az izgalmas hírt?

10. *A közös megbeszélés*

„A Frankfurter Zeitungban megjelent cikke nagyon élvezetes. De mostantól már Önt is, akárcsak engem, üldözni fogja a sajtó és a többi csöcselék, bár Önt talán kevésbé. Így még lélegzetet is nehéz venni, nemhogy dolgozni...”

*Albert Einstein Max Born fizikushoz írt egyik levelében,
1919. december 9.³⁵*

1919 júniusában Einstein visszatért Zürichből Berlinbe. Hallott valamit arról, hogy a britek a májusi napfogyatkozás során megpróbálkoztak általános relativitáselméletének bizonyításával. Nem értesítették róla, hogy az expedíció valóban megtörtént, megvannak a mérési eredmények, sőt ezek az elméletet bizonyítják. Az embert, aki annyi időt töltött, és annyi erőfeszítést tett a saját területén kívüli dolgok tanulmányozására (pl. gyakorlati csillagászat, meteorológia, illetve minden más olyan terület, amely kapcsolatba hozható a napfogyatkozás alatt történő csillagmegfigyeléssel), és aki kétségbeesetten udvarolt Freundlichnak és más csillagászoknak abban a reményben, hogy elmélete végre kísérleti bizonyítást nyer – egyszerűen nem értesítették. Bár Einstein minden tőle telhetőt megtett, hogy munkája ismertté váljon Nagy-Britannia, az ellenséges ország tudósai számára, ugyanezek a brit tudósok békeidőben a szabad, határokkal nem akadályozott információáramlás ellenére nem tudatták vele, hogy elméletét bizonyították. És nemcsak a friss hírt nem osztották meg a relativitáselmélet atyjával, hanem *egyáltalán* nem közölték vele az eredményt. 1919 szeptemberében Einstein kétségbeesésében

³⁵ Max Born, *A Born-Einstein levelek (The Born-Einstein Letters)*, New York: Walker, 1971, 18. oldal.

holland Lorentz barátjától érdeklődött és így másodkézből tudta meg, hogy Eddington és munkatársai őt igazolták.



A Solvay Fizikai Kongresszus a Metropole Hotelben

Einsteinnek három jó barátja volt Hollandiában: Lorentz, de Sitter és Ehrenfest, hármuk közül a legfiatalabb, körülbelül Einsteinnel egykorú. 1911-ben Belgiumban több kiváló fizikus találkozott, hogy Einstein relativitáselméletéről tárgyaljon; ez volt a Solvay Kongresszus. Lorentznek itt jutott eszébe, hogy meghívja Einsteint a leideni egyetemre. Ez azért lett volna előnyös, mert így napi kapcsolatban lehetett volna barátaival, akik egyben elméletének apostolai is voltak. Einstein mégis visszautasította az ajánlatot, és inkább Berlinbe ment, ahol szerinte nagyobb fizikusok voltak, például Planck.

Einstein bizonyára sajnálattal mondott nemet barátjának, aki de Sitterrel és Ehrenfesttel együtt a következő években is tovább dolgozott Einstein relativitáselméletén. Kutatásuk folytatódott az egész évtizeden át – próbálták követni Einsteint, aki állandóan módosította és javította egyenleteit. Maga

Einstein így írt erről: „...gondolatmenetem hibáinak kétévi munkát köszönhettem, mielőtt 1915-ben végre felismertem őket. Vezeklésül visszatértem a Riemann-féle görbülethez, amelynek segítségével megtaláltam a kapcsolatot a kísérleti csillagászzal.”³⁶

Ehrenfest, Lorentz és de Sitter folyamatos levelezést folytatott Einsteinnel, amelynek során minden szempontból megvitatták a kibontakozó elméletet. Felmerül a kérdés, hogy Einstein nem járt volna-e jobban, és nem ért volna-e célba gyorsabban, ha a gögös Berlin helyett Leident választja. A kozmológia szempontjából mindenképpen előnyösebb lett volna, ha Planck helyett de Sitterrel tart fenn szorosabb kapcsolatot. Akárhogyan is, 1919-ben a hatvanhat éves Lorentz hozta meg az első hírt Eddington sikeréről. Einstein nem bírt magával az örömtől. Szeptember 27-én, nem sokkal a hír kézhezvétele után, így írt: „Drága Édesanyám! Ma csodálatos hírt kaptam. H. A. Lorentz megtáviratozta nekem, hogy az angol expedíciók valóban megerősítették a Nap okozta fényelgörbülés elméletét.”

Ezalatt Angliában az ottani tudósok Einsteinnel mit sem törődve, szorgalmasan dolgoztak az általános relativitáselméleten. Az ügyet teljesen a magukénak tudták: az ő tudósaik, az ő expedícióik tették valósággá az általános relativitáselméletet. Elérkezett az idő, hogy felfedezésüket tudassák a világgal, és az eredményeket vitára bocsássák – mintha valami politikai témáról lenne szó egy parlamentáris rendszerben. 1919 novemberében egy történelmi megbeszélésre került sor Londonban. A konferenciát a Királyi Csillagászati Társaság és a Királyi Társaság közösen rendezte. Itt ellenérvek és bizonyítási kísérletek hangzottak el az általános relativitáselmélet ellenében és mellett, valamint a májusi expedíciók eredményeinek különböző értelmezései, amelyeket

³⁶ Einstein, Albert: *Az általános relativitáselmélet eredetei (The Origins of the General Theory of Relativity)*, Glasgow, U. K.: Jackson, Wylie, 1933.

megtárgyaltak, ízekre szedtek és kiszínezték. De Einstein nem volt jelen, sőt amennyire tudom, meg sem hívták. Érdekes módon Einstein mégis ennek a londoni találkozásnak köszönheti világhírét; itt nevezték ki a huszadik század legnagyobb tudósának. Ezek az események változtatták egyszerű fizikusból aktív és tiszteletre méltó személyiséggé, aki azután nemcsak a tudományos, hanem más, az egész világot érintő kérdésekben is hallatta hangját.

1919. november 6-án Sir Joseph Thomson, az Order of Merit (a legmagasabb brit értelmiségi kitüntetés) tulajdonosa, a Királyi Társaság elnöke megnyitotta az ülést. Felkérte a királyi csillagászt, hogy adja elő, hogy mi volt a tavaly májusi napfogyatkozási expedíció célja és eredménye. Sir Frank Dyson az emelvényre lépve hosszú szónoklatban adta elő, hogy hogyan merült fel a gondolat és hogyan szervezték meg az expedíciót, majd összefoglalta annak eredményeit. Így folytatta: „A fénysugárnak az elmélet alapján számított elgörbülése az azt kibocsátó csillagot eltávolítja a Naptól. Ha ezt az eltérést mérni kívánjuk a fényképen, gondot okoz annak megállapítása, vajon milyen méretarányú a felvétel. Ennek meghatározása a lemez külseje felé található csillagokon múlik, hiszen az Einstein-hatás leginkább a Naphoz közelebb lévő csillagokra érvényesül, így nem lesz nehéz megkülönböztetni a két okot, amely a csillag helyzetét befolyásolja.”³⁷

A királyi csillagász igen hosszúra sikerült beszéde után, amely felsorolta az eredmény, tehát a Sobralban és a Principe-szigeten észlelt összes csillag helyzetváltozásának minden részletét, elérkezett az idő Crommelin előadására, aki a sobrali kutatók vezetője volt. Ő azzal kezdte, hogy nem tud sok

³⁷ „A Királyi Társaság és a Királyi Csillagászati Társaság közös napfogyatkozási megbeszélése” („Joint Eclipse Meeting of the Royal Society and the Royal Astronomical Society”), The Observatory: A Monthly Review of Astronomy, XLII. kötet, 545-ös szám, 1919. november, 389. oldal.

mindent hozzátenni a királyi csillagász által előadottakhoz, kivéve, hogy megköszöni a brazil hatóságoknak, hogy olyan sok mindenben segítették a csapatot, és név szerint megemlített minden egyes brazil hivatalnokot, aki valamiben a segítségükre volt. Köszönetet mondott a gőzhajó legénységének, a tolmácsoknak, a meteorológusoknak és a többi segítőnek. Utána következett Eddington. Ő nem untatta a hallgatóságot unalmas részletekkel és ostoba, nagyképű tirádákkal. Valószínűleg ő volt az egyetlen a jelenlévők közül, aki tisztán és alaposan értette az általános relativitáselméletet, és így az egybegyűlteket egy valóságos bűvészmutatvánnyal kápráztatta el.

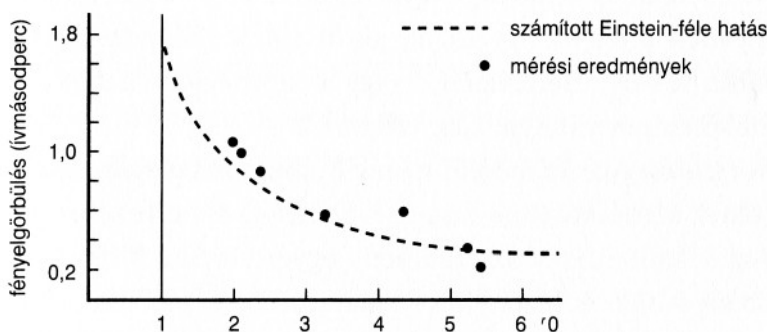
A történetek gyors elmesélése után Eddington belevágott a térgörbületének kérdéskörébe – hiszen expedíciója éppen ezt bizonyította be. Azt mondta, hogy az eredmény egyértelműen a fénysugár nagyobb elgörbülését bizonyítja – tehát az Einstein elmélete szerintit, és nem azt, amelyet a newtoni axiómákból lehetne kiszámítani. Így folytatta: „A fénysugár elgörbülését úgy lehet a legegyszerűbben megmagyarázni, ha azt mondjuk, hogy azt a fény súlya okozza. Tudjuk, hogy a fénysugár útján impulzus halad végig. A gravitáció hatására egy másik irányú impulzus keletkezik, és ez okozza a sugár elgörbülését.” Ahhoz, hogy még jobban megértesse a különbséget a newtoni és a megfigyelt kétszer akkora fényelgörbülés között, amely az einsteini elméletből is kiszámítható, Eddington létrehozott két geometriai *térmetrikát*. Az idő dimenzióját figyelmen kívül hagyva, csak a térre összpontosítva, a két elmélet távolságeleme az új metrikák szerint a következő:

Newton törvénye: $ds^2 = dr^2 - r^2 d\theta^2$

Einstein törvénye: $ds^2 = -(1 - 2m/r)dr^2 - r^2 d\theta^2$

Az új tényező, az $(1 - 2m/r)$ különbözteti meg egymástól a kétféle távolságot, ahol m egy részecske tömege, továbbá r és θ

a tér polárkoordinátái. Az einsteini távolság méri ténylegesen a tér görbülését – vagyis nemeuklideszi természetét –, amelyet a nagy tömegű Nap okoz. Decemberben, a Királyi Csillagászati Társaság következő ülésén Eddington ezt így fogalmazta: „Nem nagyon lehet az eredményeket az euklideszi geometriával összeegyeztetni, de ez csak azt jelenti, hogy olyan geometriát kell választanunk, amely itt is működik.”³⁸



A találkozó szenvedélyes vitába torkollt két vélemény képviselői között. Az Eddington-Dyson-vonal szerint az általános relativitáselmélet, vagy legalábbis annak a fényelgörbülésre vonatkozó része, bizonyítást nyert. Az ellenzők vezére Sir Oliver Lodge volt. Ő már az expedíciók előtt biztos volt abban, hogy nem fogják bebizonyítani a fényelgörbülés jelenségét. Makacsul hitt a régi elméletben, állhatatosan ragaszkodott az éter mítoszához és a többi fizikai elmülethez, amelyek hatalmát az általános relativitáselmélet fenyegette. Táborába tartozott Ludwig Silberstein, aki azt állította, hogy Einstein elmélete azért nincsen még bebizonyítva, mert nem észleltek még gravitációs vöröseltolódást. Eddington türelmesen elmagyarázta, hogy a

³⁸ „A Királyi Csillagászati Társaság ülése” („Meeting of the Royal Astronomical Society”), The Observatory: A Monthly Review of Astronomy, XLIII. kötet, 548-as szám, 1920. január, 35. oldal.

most kapott eredmény eldönt minden vitát, és a vöröseltolódás egy másik kísérlet.

Végül diadalmaskodott az Eddington-Dyson-elmélet. A tér görbült és az általános relativitáselmélet bizonyítást nyert. Sir J. J. Thomson, a Királyi Társaság elnöke összefoglalta a többség véleményét, amikor így zárta le a történelmi találkozót: „Newton óta ez a legfontosabb eredmény, amelyet a gravitációval kapcsolatban elértünk, ezért illő volt, hogy annak a társaságnak az ülésén jelentsük be, amellyel ő olyan szoros kapcsolatban állt. Ha továbbra sem cáfolja semmi Einstein érvelését – és már kiállt két próbát: a Merkúr perihéliumát és a nemrég történt napfogyatkozást –, akkor ez az eredmény az emberi gondolkodás egyik legmagasabb rendű terméke. Az elmélet egyetlen gyenge pontja az, hogy nehéz megfogalmazni.” A híres, nemrég elhunyt asztrofizikus, S. Chandrasekhar, emlékeztetett rá, hogy milyen nehézséget látott a dologban J. J. Thomson. Az ülés során valószínűleg kibontakozott egy olyan nézet, hogy az általános relativitáselméletet olyan nehéz elmagyarázni, hogy a világon csak néhány ember értené meg. Chandrasekhar a következő történetet mesélte.

Az ülés utáni díszvacsorán Ludwig Silberstein Eddingtonhoz lépett, és azt mondta:

– Eddington professzor, ön valószínűleg a világ azon három emberének egyike, aki érti az általános relativitáselméletet.

Eddington habozni látszott, ezért Silberstein folytatta:

– Ne szerénykedjen, Eddington.

Mire Eddington:

– Ellenkezőleg. Azon gondolkodtam, hogy ki lehet a harmadik.³⁹

³⁹ S. Chandrasekhar, *Eddington: korának legnagyobb asztrofizikusa* (*Eddington: The Most Distinguished Astrophysicist of His Time*), London: Cambridge University Press, 1957, 30. oldal.

A Királyi Csillagászati társaság által rendezett vacsora után Eddington felolvasta versét, amelynek rubái stílusú versszakai a napfogyatkozási expedíció sikerének állítanak emléket.

Felmerül sokszor a vád, hogy az óra siet, avagy áll.
De szerkezete, mint egy szív, egyenletesen kalapál.
Nézd, már tisztul az ég, lám, a szerencse velünk,
Fénylő félhold a napunk, nincs többé takarás.

Oly rövid most az idő, restek nem lehetünk.
Összesen öt perc van a tizenhat képre nekünk.
Látni a csillagokat, és glória tűnik elénk,
A sötét árnyék peremén fénysugarak – na gyerünk!

Mert ami körbevesz itt, kint, bent, fent s az egész,
E szép csoda nem más, mint egy varázslatos árnyjáték.
Vászonul szolgál az ég, gyújtópontul a Nap,
Szereplői mi vagyunk – nagy itt a jövés-menés.

Maradjon a bölcseknek a sok összegyűjtött adat.
Egy dolog biztos: a FÉNYNEK márpedig SÚLYA is van.
Egy dolog biztos, a többin van idő töprengnetek:
Az érkező fénysugarak a Nap körül ELHAJLANAK.

A találkozó nem került el a brit sajtó figyelmét, és másnap, november 7-én megjelent a nagy hír. A londoni *Times* szalagcíme így szólt: „Tudományos forradalom – Newton törvényeinek veresége – A tér »görbült«”. Hamarosan követte a *New York Times* és a világ többi újsága és magazinja. Einstein néhány nap alatt világhírességgé – lehet, hogy a világ leghíresebb emberévé – vált.

Az elkövetkező években más napfogyatkozási expedíciók is megerősítették Eddington és Dyson 1919-es eredményeit. Az első ilyen, 1922-ben nagyon jó eredményekkel támasztotta alá

Einstein elméletét, és ez igaz majdnem mindegyik dokumentált expedícióról – egy kivételével. A Királyi Csillagászati Társaság 1932. januári ülésén Erwin Freundlich, akkor már mint skót csillagász, beszámolt *saját* napfogyatkozási expedíciójáról. Azt állította, hogy az általa észlelt fényelgörbülés sokkal nagyobb volt, mint ami az Einstein-féle elméletből következne.⁴⁰ Ezek után nem csoda, hogy az Einstein és Freundlich között húsz éve fennálló sűrű levelezésnek 1932-ben hirtelen vége szakadt. Einsteinre az a kínos feladat várt, hogy elméletét megvédje hajdani barátja téves következtetésével szemben. L. Mayr of Gmundennek (aki valószínűleg laikusként az újságokból szerzett tudomást Freundlich eredményeiről) küldött levelében Einstein így írt vidéki (caputhi) házából 1932. április 23-án⁴¹: „Freundlich úr eredményei a kísérleti eredmények alapján hibásan számított értéken alapulnak (ezt a Lick csillagvizsgálóban dolgozó Trümpler kolléga világosan bebizonyította, de a cikk még nem jelent meg). Ha a számításba nem csúszott volna hiba, az elmélet újra bizonyítást nyert volna.”

A Freundlich publikálta eredményeket kétségkívül senki sem vette komolyan. És a Királyi Csillagászati Társaság 1923-as ülésén, miután ismertté váltak az 1922-es napfogyatkozás bizonyító eredményei, az elégedett Eddington így nyilatkozott: „Azt hiszem, Bellman mondta a következő szabályt a »Cápavadászatban«: ‘Amikor háromszor mondom, akkor igaz.’ A csillagok most már háromszor mondták három különböző expedíciónak; biztos vagyok benne, hogy igazat mondanak.”

Bizonyos volt már tehát, hogy egy nagy tömegű test közelében a tér nemeuklidészi. Felmerül hát a kérdés: Milyen az *egész* világegyetem alakja, nem csak egy nagy tömegű test,

⁴⁰ Lásd a ³⁹ lábjegyzetet.

⁴¹ Német nyelvű újranyomás: Michael Griming, *Albert Einstein háza (Ein Haus für Albert Einstein)*, Berlin: Verlag der Nation, 1990, 388-389. oldal.

például egy csillag közvetlen környezete? Einstein ebben a kérdésben is a többiek előtt járt. Mivel régóta biztos volt abban, hogy elmélete helyes és a tér nemeuklideszi, már az 1919-es napfogyatkozás előtt két évvel elkezdett azon töprengeni, vajon milyen alakú az egész világegyetem, és hogyan keletkezett. Ez a kérdés élete legellentmondásosabb feltevéséhez fog vezetni. 1917-ben a téregyenlet alakítása során Einstein tudtán kívül kinyitotta Pandora szelencéjét.

11. *Kozmológiai megfontolások*

„Gyakran gondolkodtam rajta, hogyan lehet, hogy Einstein egy ennyire egyszerű feltételezésből indult ki... a világegyetem annyira egyszerű, hogy egyváltozós differenciálegyenlettel lehet elemezni – minden csak az idő függvénye. Einsteinre természetesen jellemzőek voltak a briliáns ösztönös megérzések, és egészen biztos, hogy most is az igazság közelében járt – a világegyetem valóban így néz ki.”

*James Peebles, princetoni kozmológus, 1990*⁴²

1917 februárjában Albert Einstein egy cikket küldött a Porosz Tudományos Akadémiának. Innen számítjuk a modern kozmológia keletkezését. A cikkben Einstein a nemrég befejezett általános relativitáselmélet teljes eszköztárát bevetette a világegyetem mint egész vizsgálatához. A cikk címe: *Kozmológiai megfontolások az általános relativitáselmélet alapján* (*Kosmologische Betrachtungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie*). A kutatók feltételezése szerint Einstein Ernst Mach egyik ötlete miatt terjesztette ki kutatását az egész világegyetemre.⁴³

Mach azt állította, hogy a világban megfigyelhető tehetetlenségi erőket az összes állócsillag mint vonatkoztatási rendszer okozza. Ezen elmélet neve: Mach-elv. Azt mondja ki, hogy egy tömegpont teljes tehetetlensége a világegyetem összes többi tömegének hatása. A Mach-elv megértéséhez vizsgáljuk meg először a Foucault-ingát. Ezt az ingát több tudományos múzeumban és más nyilvános helyen is

⁴² A. Lightman és R. Brawer: *Eredetek: A modern kozmológusok élete és világa* (*Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists*), Cambridge, MA: Harvard University Press, 1990.

⁴³ Lásd például: Max Born, *Einstein relativitáselmélete* (*Einstein's relativity*), New York: Dover, 1965, 362. oldal.

megtekinthetjük. Az inga egy magas mennyezetre van felfüggesztve, és nagy, körszerű görbéket ír le a padló fölött. Alapelvét Jean Leon Foucault fedezte fel (1819-1868).

Ha az inga már több órája leng, láthatóvá válik, hogy az inga lengési síkja elfordul. Ez azért van, mert mozgása során *lengési síkja* állandó marad, a Föld viszont közben elfordul. Mach megfogalmazásában: a Foucault-inga megtartja lengési síkját a világegyetem állócsillagaihoz képest, a Földtől függetlenül.

Einstein cikke egy régi egyenlet új elemzésével kezdődik. Az egyenlet Newtontól és a francia Simeon-Denis Poisson (1781-1840) matematikustól származik. Newton arra a következtetésre jutott, hogy nem létezhet véges világegyetem. Már az 1690-es években tudta, hogy mivel a tömegvonzás minden tömeggel rendelkező testet a többi tömeggel rendelkező test felé vonz, a világegyetem nem lehet statikus vagy véges. Miért? Ennek egy lehetséges bizonyítása azon a fizikai tényen alapul, hogy a tömegvonzás mindig a testek középpontjára hat – a tömegközéppontra. Ha elképzeljük, hogy a tér egy hatalmas, de véges gömb galaxisokkal, csillagokkal és csillagközi anyaggal, a gravitációs erő a gömbben lévő összes anyag tömegközéppontjára összpontosul. Egy ilyen statikus és véges világegyetemben az összes anyag, az összes objektum a tömegközéppontba gyűlné, és ezen az egy ponton összeomlana minden.

Newton azt mondta, hogy ha a világegyetem végtelen nagy terében végtelen sok csillag lenne, ez nem történhetne meg, hiszen így nincsen olyan tömegközéppont, ahová minden „beleesne”. Érvelése ugyanakkor hibás, hiszen egy végtelen világegyetem minden egyes pontját az egész középpontjának tekinthetjük, mivel onnan bármerre nézve végtelen sok csillagot látunk. A tudósok később rájöttek, hogy ezt a problémát a matematikai határérték fogalmával lehet megközelíteni: tételezzünk fel egy véges világegyetemet, és vegyünk fel hozzá újabb és újabb csillagokat minden sugár irányában, végtelen

számban. Ha így gondolkodunk, látjuk, hogy még egy végtelen világegyetem is – ha a gravitáció, az egyetlen nagy hatótávolságú erő, állandó – végül össze fog omlani.

Ennek ellenére Einstein cikkét a Newton-féle gravitációelmélet bemutatásával kezdi. A Poisson-egyenlettel folytatja; ez a differenciálegyenlet azt írja le, hogy hogyan változik a Φ gravitációs mező az anyageloszlás függvényében. Einstein megjegyzi, hogy a végtelen térben a Φ gravitációs mező valamely véges számhoz tart. Azt állítja, hogy ha a világegyetem térbeli kiterjedését végtelennek tekintjük, akkor általános relativitáselméleti egyenleteihez korlátozó feltételeket kell felvenni. Einstein szerint a gravitációs tér megfelelő korlátozó feltétele az lenne, hogy a ρ , a világegyetem összes anyagának átlagos sűrűsége, gyorsabban tart 0 felé, mint $1/r^2$, ahol r a végtelenbe tartó, gömb alakú világegyetem középpontjától mért távolság. Ez a feltétel egyfajta végeességet adna a világegyetemnek, bár az összes tömeg végtelen lenne.⁴⁴

Einstein tovább töprengett a világegyetem általa felállított modelljén, amelyben Newton és Poisson gravitációs mezőjét, Φ -t saját téregyenletének $g_{\mu\nu}$ Riemann-féle metrikus tenzora váltja fel, és a Newton- és Poisson-féle ρ sűrűség helyett az einsteini $T_{\mu\nu}$ energiainpulzus tenzora áll.⁴⁵

Ezek a tenzormennyiségek szerepeltek az Einstein által két évvel korábban befejezett általános relativitáselmélet alapján kapott téregyenletben:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} R = -\kappa T_{\mu\nu},$$

(ahol $\kappa = 8\pi G$, de az egyenlet a fenti formájában tömörebb.)

⁴⁴ Albert Einstein: *Kozmológiai megfontolások az általános relativitáselmélet alapján* (*Cosmological considerations on the General Theory of Relativity*), újranyomás: Albert Einstein, *A relativitás alapelve* (*The Principle of Relativity*), New York: Dover, 1923, 178. oldal.

⁴⁵ Ne felejtjük, hogy az energia és a tömeg között szoros összefüggés van Einstein $E = mc^2$ képlete alapján.

Einstein azon gondolkodott, hogyan lehetne konzisztens módon kiterjeszteni a Newton-Poisson összefüggést a tenzorokkal felírt gravitációs téregyenletben úgy, hogy az általános relativitáselmélet az egész világegyetemre vonatkozzon, ne csak egy csillag vagy galaxis lokális környezetére.

Einstein tehát abból indult ki, hogy az anyagsűrűség gyorsabban tart a nullához, mint a világegyetem sugara reciprokának négyzete. Ekkor viszont egyenletének egy érdekes feltételt kell kielégítenie: az égitestek által kibocsátott sugárzás egy része elhagyja a newtoni világegyetemet, és a végtelenbe távozik. Abból a tényből, hogy a gravitációs mező állandó lesz a végtelen távolban, Einstein arra következtetett, hogy egy nagy tömegű test, például egy csillag, ugyanúgy elhagyhatja a világegyetemet, mint ahogyan egy fénysugár a végtelenbe tart. Egy csillag így győzedelmeskedhet a newtoni vonzerőn, és „térbeli végtelenséget érhet el”. Azt írja: „A statisztikus mechanika alapján ez az eset időről időre elő kell, hogy forduljon mindaddig, amíg a csillagrendszerben az összes energia elegendő ahhoz, hogy az egy csillagra összpontosulva ezt a csillagot elindítsa a végtelenbe, ahonnan nem térhet vissza.”⁴⁶

Ezen a ponton Einstein megdöbbentő felfedezést tett: a világegyetem *tágul* – a csillagok, az anyag és a sugárzás mind a „végtelen” felé száguldanak; ha nem így lenne, a világegyetem összeomlana, akár végtelen a benne lévő csillagok száma és az anyag mennyisége, akár nem.⁴⁷

⁴⁶ Lásd a ⁴⁴ lábjegyzetet.

⁴⁷ A végtelenség fogalma a világegyetemünk rendelkezésére álló tér tekintetében a következőképpen szemléltethető. Képzeljünk el egy síkot, amely minden irányban tovább ér, mint ameddig ellátunk. A látóhatáron (bármely irányban) a sík fölfelé hajlik és egyre meredekebben emelkedik. Fent, a *határon*, a felhajló felületek egy pontba futnak, amely nagyon magasan a fejünk fölött helyezkedik el – ez a végtelen pont. (Ezt a matematikai modellt a sík egy pontos kompaktifikációjának nevezik.) Ha

Így Einstein saját téregyenletéből felfedezte, hogy a világegyetem tágul – de nem hitt saját következtetésében. Cikkében megismételte, hogy a csillagok megfigyelt sebessége viszonylag kicsi (azaz egyet sem láttunk még, amely a végtelenbe száguldana, hiszen ahhoz nagyobb sebességre lenne szükség). Azt írja: „Megpróbálhatjuk elkerülni ezt a furcsa nehézséget, ha feltételezzük, hogy a végtelenben a helyzeti energia korlátja igen nagy. Ez akkor jelenthetne kiutat, ha a gravitációs potenciál nem függne szükségszerűen az égitestektől. Az az igazság, hogy a gravitációs mezőben előforduló nagy potenciálkülönbségeket eddig ellentmondásnak kellett tekintenünk. Ezek a különbségek azonban valószínűleg olyan kicsik, hogy az általuk létrehozott csillagsebességek nem haladják meg a ténylegesen megfigyelt sebességeket.”⁴⁸ Bár csak Einstein tudta volna, ami ma már nyilvánvaló! A legtávolabbi megfigyelt galaxisok tőlünk (a végtelen felé) a fénysebesség több mint 95%-ával távolodnak.

De Einstein ezt nem tudhatta. Az ő világegyetemében csak egy galaxis volt: a Tejút. 1919-ben még legközelebbi szomszédunkról, a csak 2,2 millió fényévre lévő Andromédáról sem tudták, hogy egy másik galaxis. Azt hitték, hogy egy csillagköd – az égbolt egy homályos darabja, amelyről azt gondolták, gázok és por alkotják – saját galaxisunkban, a világegyetemben. És itt, a Tejúton a csillagok nem mozognak túl gyorsan. Így Einstein azt az utat választotta, amely az akkori ismeretek fényében helyesnek tűnt – nem hitte el, ami az elméletből következett, és ezért megpróbálta az elméletet úgy megváltoztatni, hogy az az általa ismert valóságot írja le: egy statikus világegyetemet, amely valamilyen titokzatos oknál fogva nem omlik össze a középpontjába.

a sík két dimenziója helyett hármat vagy négyet (tér és idő) választunk a modellhez, megkaptuk a végtelen terű világegyetemet.

⁴⁸ Lásd a ⁴⁴ lábjegyzetet.

Einstein megjegyzi, hogy nem ő az első, aki az általános relativitáselméletet a világmindenségre próbálja alkalmazni, de a másik tudós ehhez egy olyan módszert választott, amely szinte egyenértékű az elmélet feladásával. De Sitterről van szó, aki 1916 novemberében az Amszterdami Tudományos Akadémia közleményeiben publikált egyik cikkében már foglalkozott a kérdéssel. De Einstein így folytatja: „Be kell ismernem, hogy egy ilyen sarkalatos kérdésben a teljes beletörődés nekem nem menne könnyen. Nem tennék le a probléma megoldásáról, amíg csak nem gondoltam végig, hogy az összes lehetséges út zsákutcába torkollik.”

Einstein gravitációs téregyenlete matematikailag elegáns, és ez volt az egyik ok, ami miatt Einstein már az általános relativitáselmélet kísérlet bizonyítása előtt biztos volt helyességében, és ezért mondta, hogy „sajnálta volna az Urat”, ha a kísérlet nem sikerül, hiszen „az elmélet helyes”. Így hát megzavarta, hogy egy valószínűleg statikus világegyetemet kell összeegyeztetnie a gyönyörű egyenlettel, amely viszont táguló világegyetemre utal. De, mint mondta, mindenképpen meg kellett próbálnia megteremteni az összhangot a valóság és az egyenlet között. És ez sikerült is. Einstein *megváltoztatta* a tökéletes egyenletet, amely olyan jó szolgálatot tett neki és a fizikának a természetes világ jelenségeinek leírásában. Az

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} R = -\kappa T_{\mu\nu}$$

egyenletet a következőre cserélte fel:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} R - \lambda g_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu}.$$

Az új egyenlet egy egyszerű új állandót tartalmazott, amelyet a görög lambda betűvel jelölt, és ezzel szorozta meg a $g_{\mu\nu}$ metrikus tenzort. Ez a módosítás megőrzi azokat a fontos fizikai jellemzőket, amelyeket egy ilyen sokatmondó egyenletől el lehet várni. Einstein módosítása révén a helyi

jelenségek (például a bolygók mozgásának) leírása nem sokat változott, de nagy távolságok esetén a különbség már jelentős volt. Eredeti ötlet volt – olyasvalami, amire csak ő volt képes.

Einstein azt a tényt használta ki, hogy a tér nemeuklideszi. Az általa tíz mennyiséggel leírt térgörbület a g metrikus tenzor négy dimenziójában számba jövő tíz együtthatójához kapcsolódott. Einstein egy kicsit – λ -val – megcsavarta mind a tíz elemet. Tulajdonképpen a világegyetem geometriájával mesterkedett, azt idomította az egyenlethez. A λ szorzót, amelynek segítségével ezt tette, később *kozmológiai állandónak* nevezték. És Einstein soha nem tudta túltenni magát azon, hogy meg kellett teremtenie. A kozmológiai állandó ezután egész életében kísértette.

Einstein kozmológiai állandót tartalmazó egyenlete sok szempontnak megfelelt. Az egyenlet volt a teljes világegyetem legelső matematikai modellje. Modellje szerint a világegyetem statikus – tehát nem tágul, nem szűkül. Gömb alakú és korlátos. Görbülete állandó. A newtoni végtelenség fogalma pedig meg van oldva, hiszen a világegyetem véges, de nincsen határa. Ha nehéz elképzelni, hogy milyen lehet egy véges, de nem határos modell, tekintsük a gömbfelületet. Itt a főkör a legrövidebb út két pont között. Ha ezt a görbét a Föld felszínén követjük, előbb-utóbb visszaérünk a kiindulópontra. Egy ilyen geodetikus görbének nincsenek határai, a felület ugyanakkor véges. Einstein világegyeteme a földfelszín háromdimenziós analógiájára épül. Itt egy geodetikus görbe (tehát a két pont közötti legrövidebb távolság) mentén haladó fénysugár vagy részecske visszaér a kiindulópontba – igaz, nagyon hosszú idő múlva. Egy ilyen világegyetem tehát véges, de határtalan. Einstein világegyetemének görbülete az időtől független. A világegyetem homogén, vagyis mindenütt ugyanolyan. Izotropikus is, vagyis minden irányban azonos tulajdonságú – nincsen kitüntetett irány.

Einstein háromdimenziós gömb alakú világegyeteme görbületének sugara szoros kapcsolatban áll a λ kozmológiai állandóval; mindkét érték az egész világegyetem minden anyagának össztömegétől függ. Ha a világegyetem tömege nagy, kisebb a görbület sugara – a hatalmas gömb görbébb, ha tömege nagyobb. De az anyag sűrűségével a tér görbülete is csökken. Einstein ezt az általános relativitáselmélet lokális eredményeivel indokolta. Kozmológiai cikkében ezt írta: „Az általános relativitáselmélet szerint a négydimenziós téridő kontinuum metrikus jellemzőjét (görbületét) minden egyes pontban az ott lévő anyag és annak természete határozza meg.” Mivel az anyag nagyon sokféle lehet a térben, a tér metrikus tulajdonságai ennek megfelelően roppantul bonyolultak lehetnek.

De Einstein talált egy kiutat. Azt mondta, hogy ha a világegyetem nagyléptékű szerkezetét tekintjük, és nem az olyan helyi tulajdonságokat, mint például a nagy tömegű testek környezetében tapasztalható nagy görbület, akkor inkább a tér *átlagos* sűrűsége lesz a megfelelő paraméter. Így „az anyagot a hatalmas térben egyenletes elosztásúnak tekinthetjük, ezért sűrűségének eloszlása olyan függvény lesz, amely csak lassan változik.”

Einstein bevezette a ρ paraméterrel kifejezett fogalmat, ahol ρ a világegyetem összes anyagának átlagos sűrűségét jelenti. Ez a fogalom egészen a huszadik század végéig minden kozmológiai elmélet fontos alapeleme maradt. Einstein úgy gondolta, hogy világegyetemének egy újabb kíváncs tulajdonságát találta meg, hiszen a modell, amelyet egyenlete egyik megoldásául kapott, arra utalt, hogy amikor a kozmológiai állandó nem nulla, az egyenlet nem teljesül, ha a ρ tömegsűrűségi paraméter nulla. Így az egyenlet nem alkalmazható az olyan világegyetemre, amelyben nincsen anyag. Úgy gondolta, hogy ez a tulajdonság tulajdonképpen megnyugtató.

Az Einstein egyenletébe bevezetett kozmológiai állandó először egészen ártatlan dolognak tűnt. Einstein saját nagy egyenletéről volt szó, miért ne változtathatná meg, ha kedve tartja? De hamarosan felmerült az első kérdőjel. Hollandiában az öreg, fehér sörényű és kecskeszakállú Willem de Sitter még mindig a kozmológiával és az általános relativitáselmélettel foglalkozott. Ő, Ehrenfest és Lorentz voltak a jó tanítványok, akik akkor is Einstein alkotásának gazdagításán dolgoztak. Még 1917 elején, tehát Einstein kozmológiai dolgozatának évében, megjelent egy cikk de Sittertől, amely igencsak zavarba hozta Einsteint. Sitter ugyanis a téregyenlet egy másik lehetséges megoldását mutatta be, szintén kozmológiai állandóval. De Sitter megoldása viszont illet az anyagot egyáltalán nem tartalmazó világegyetemre is – egy teljesen üres világegyetemre.

Einsteint ez azért érintette kínosan, mert ő tulajdonképpen úgy indult el a kozmosz felderítésére, hogy Mach után feltételezte, a világegyetem tömegeloszlása tehetetlenségi rendszereket hoz létre (például a Foucault-ingát, amelynek a lengését a világegyetem összes anyaga befolyásolja). Úgy látszik, Einstein ezt teljesen elhitte, és prágai éve során nagyon valószínűnek tartotta azt a feltételezést, hogy egy tömegpont teljes tehetetlensége az összes többi tömeg jelenlétének a következménye – a tömegpont tulajdonképpen kölcsönhatásban van a világegyetem összes többi tömeggel rendelkező testével. Később, Zürichben még inkább meggyőződött ennek az elvnek az igazáról, és meg is írta Machnak, hogy ha igazolódik a fényelgörbülés létezése, ez Mach feltételezését bizonyítaná.

De amikor 1917-ben megírta kozmológiai cikkét, amely részben Mach feltételezésével is foglalkozott, egy kicsit megingott. Ezt írta Paul Ehrenfest barátjának: „már megint elkövettem valamit a gravitációval kapcsolatban, ami miatt lehet, hogy bolondokházába csuknak.” A cikk megjelenése előtt egy de Sitterrel folytatott beszélgetés során megemlítette,

hogyan lehet, hogy a tehetetlenség csak a világegyetemben létező összes többi anyagnak köszönhető. Azonban a cikk megjelenése után de Sitter megoldásából az következett, hogy nincsen szükség a világegyetemben a tömeg jelenlétére a tehetetlenségi rendszerekhez. És de Sitter megoldásának volt még egy fontos jellemzője, amelyet azonban akkor még senki sem vett észre. Az ő megoldása szerinti világegyetem jól megvolt anyag nélkül is, ha viszont mégis volt benne anyag – *nem volt statikus*.

Volt valamiféle kozmikus taszítóerő az összes test között, hiszen azok távolodtak egymástól. Ez a jelenség az egyenlet megoldása szerint csak nagy távolságok esetében érvényesült. A furfangos de Sitter ezért elkezdett olyan csillagászati beszámolókat keresni, amelyek a világegyetem tágulását bizonyítanák, de ilyet nem talált. Jegyezzük meg, hogy a de Sitter-féle világegyetem-tágulás nem egyszerű. Hasonlít ahhoz a felfúvódó világegyetem-elmélethez, amelyet az MIT-n dolgozó Alan Guth dolgozott ki 1980-ban. De ez csak az első, és nem is a legnagyobb csapás volt, amelyet Einstein elméletének el kellett szenvednie a „rosszindulatú” kozmológiai állandó bevezetése miatt.

Bár ezt maga Einstein soha nem mondta, biztos, hogy meg volt győződve arról, hogy a világegyetem helyes téregyenletének nem létezhet olyan megoldása, ami anyagot nem tartalmazó világegyetemeket enged meg. Egy üres világegyetem nem túl rokonszenves, és nem csak azért, mert nem érvényesül benne a Mach-féle tehetetlenségi rendszer elmélete. De Sitter cikkének megjelenése után Einstein a következő két év során sokat próbálkozott azzal, hátha megtalálja a hibát de Sitter megoldásában. De nem találta. 1919-ben mással próbálkozott. Einstein fogta a kozmológiai állandót tartalmazó egyenletet, és azzal a feltételezéssel együtt vizsgálta, hogy a T energia-impulzus tenzort az elektromágnesség okozza. A feltételezést arra az elgondolására

alapozta, hogy az elektromos töltéssel rendelkező részecskéket a gravitációs erő tartja egyben.

Ez a megközelítés volt Einstein első kísérlete a fizika elméleteinek egybefoglalására: itt például az elektromágnesességet és a gravitációt próbálta egy rendszerbe foglalni. Einstein életének hátralévő része az egyöntetű térelmélet kidolgozásával telt, de végül nem találta meg azt az egyenletet, amely leírná az összes fizikai törvényt. Az 1917-et követő években mindenesetre már nem beszélt Mach tehetetlenségelméletéről és a világegyetem összes anyagának tömegéről. És elkezdte elveszíteni bizalmát a kozmológiai állandó iránt. Hamarosan következett Einstein számára a kegyelemdöfés.

A kegyelemdöfést két amerikai csillagász adta. 1917-ben, ugyanabban az évben, amikor de Sitter és Einstein munkái napvilágot láttak, megjelent egy cikk Vesto M. Slipher tollából, aki az arizonai Flagstaffban lévő Lowell Csillagvizsgáló munkatársa volt. Slipher spirális csillagködöket vizsgált távcsövével. Akkoriban ezeket a spirálokat még a Tejút részének tekintették. De Slipher ezekben a spirális csillagködökben nemcsak a csillagok szögsebességét vette észre, hanem azt is, hogy a színpvonalak a vörös felé tolódnak el. A vöröseltolódás tényéből arra következtettek a Doppler-hatás alapján végzett számítások alapján, hogy ezek a spirális csillagködök gyorsan távolodnak tőlünk – némelyek akár hárommillió km/ó sebességgel. Slipher kezében ott volt a világegyetem tágulásának bizonyítéka, de nem tudott róla. Megállapította, hogy a megfigyelt csillagködök legtöbbje (a kivételek azok voltak, amelyekről ma már tudjuk, hogy közeli galaxisok) nagy sebességgel távolodik tőlünk, de nem tudta, hogy ezek különálló galaxisok, és azt sem, hogy ezek milyen távol lehetnek. Edwin Hubble munkája azonban hamarosan segített az eredmények értelmezésében.

Ahhoz, hogy Hubble megtegye elképesztő felfedezését világegyetemünkről, a Harvard College Csillagvizsgálója egyik csillagászának fel kellett találnia egy áttörést jelentő csillagászati eljárást. Henrietta Leavitt (1868-1921) a Harvard déli csillagvizsgálójában, Peruban dolgozott; a változó csillagokat vette jegyzékbe. Leavitt a Nagy és Kis Magellán-Felhő változó csillagainak fénygörbáját tanulmányozta. Ezek a Tejút két társgalaxisa, bár ebben az időben még egynek tekintették. A két Magellán-Felhőt a Magellán hajó 1686-os világ körüli útján fedezte fel a legénység. A Déli Kereszt közelében látták meg az éjszakai égbolton; ködösen fénylő foltoknak tűntek. Mivel mindkét Magellán-Felhő összetartozó csillagfoltnak látszott, valószínűnek tűnt, hogy nagyjából egyforma távolságra vannak tőlünk (legalábbis csillagászati léptékkal mérve.)

Ez jó becslésnek bizonyult, amelynek alapján Leavitt meglepő felfedezést tett. Közvetlen kapcsolatot talált egy változó csillag látszólagos magnitúdója és a csillag periódusa (a magnitúdóváltozások ciklusa) között. Mivel a Magellán-Felhő csillagai körülbelül ugyanakkora távolságra lehetnek a Földtől, a látszólagos magnitúdó és a periódus közötti kapcsolat valószínűleg hasonló az abszolút magnitúdó (a standard, előre megadott távolság szerinti) és a változási periódus közöttihez. A Henrietta Leavitt által vizsgált csillagok különlegesek voltak: Delta-Cephei típusúak. Nevüket az első csillagról kapták, amelyről megállapították, hogy fénye egyenletesen erősödik és gyengül: a Cepheus csillagkép delta csillagáról.

1912-re Leavitt huszonöt csillag esetében megállapította, hogy hogyan függ a magnitúdó a periódustól. Tovább folytatta összehasonlító munkáját, és rájött a matematikai összefüggésre. Minél fényesebb volt a Delta-Cephei típusú csillag, annál hosszabb volt a periódus. A két csillagászati változó ezen összefüggéséből ki lehetett számítani azoknak a csillagoknak a távolságát, amelyek közelében ilyen típusú csillagok vannak.

1917-re Leavitt módszere már alkalmazható volt bármely Delta-Cephei típusú csillag távolságának meghatározására, még a távoli galaxisokban is. Leavitt létrehozta a csillagászat első úgynevezett normálgyertyáját a kozmikus távolságok meghatározására. 1998-ban Saul Perlmutter és csapata egy másik típusú normálgyertya használatáról számolt be – az Ia típusú szupernóváról, – amellyel hasonló feladatot lehet elvégezni: a sokkal távolabbi galaxisok távolságát lehet megmérni. Az ilyen távoli galaxisokra azért nem alkalmazható a Delta-Cephei módszer, mert túl messze vannak, a hatalmas szupernóva-robbanások viszont gondos fotózás és erős távcső esetén láthatóvá válnak. Elérkezett tehát az idő, hogy Hubble megtalálja a kozmikus tágulás első ellentmondásmentes bizonyítékát.

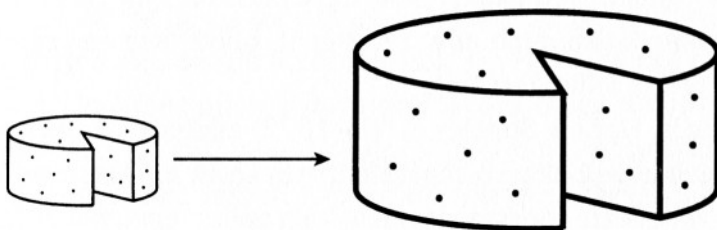
Edwin Hubble (1889-1953), a Hubble-űrtávcső névadója a huszadik század legnagyobb csillagásza. A Missouri állambeli Marshfieldben született 1889. november 20-án. Jogot tanult az oxfordi egyetemen, de hamarosan a csillagászat felé fordult, és a chicagói egyetem Yerkes Csillagvizsgálójában helyezkedett el továbbképzésre. Utána behívták katonának. Az első világháborúban Európában szolgált, majd 1919-ben, 30 évesen elbocsátották az amerikai hadseregből, és elhelyezkedhetett a kaliforniai Mount Wilson Csillagvizsgálóban. Abban az időben náluk volt a világ legnagyobb távcsöve: egy 2,5 méteres tükrös Hooker-távcső. 1923-ban Hubble megkezdte az Androméda-csillagköd megfigyelési programját; nóvákat keresett. (Az Androméda volt az égbolt legnagyobb spirális csillagködje – ma már tudjuk, hogy a két Magellán-Felhőn kívül ez a legközelebbi galaxis.) Amikor Hubble figyelmesebben megnézte az első, az Andromédában talált nóva fényképét, rájött, hogy az egy Delta-Cephei típusú változó csillag.

Kollégája, Harlow Shapley (1885-1972) addigra már megbecsülte a Magellán-Felhők távolságát Henrietta Levitt módszerével. Ezért, amikor felfedezte, hogy a nóvának vélt

csillag egy változó csillag, nagyon izgatott lett. Hubble a csillag fénygörbéjének tanulmányozása után az Androméda távolságát 900 000 fényévre becsülte (bár ma már tudjuk, hogy ennél messzebb van – 2,2 millió fényévre). Ez az eredmény elég volt ahhoz, hogy bebizonyítsa: az Androméda egy másik galaxis, és nem a Tejút része. A felfedezés eldöntötte a csillagászat úgynevezett Nagy Vitáját: vannak-e sziget-világegyetemek, vagy a világegyetem csak a Tejútrendszerből áll, és oda tartozik minden, amit az égen látunk?

Hubble, miután látta, hogy van egy, a Tejúttól teljesen különálló galaxis, óriástávcsövével az égbolt más csillagködjeire irányította, és megpróbálta megállapítani, hátha ezek is különálló galaxisok. A következő néhány évben egyedül, vagy Milton Humason (1891-1957) kollégájával együtt dolgozott. Minden energiáját arra fordította, hogy a 2,5, illetve 5,1 méteres óriástávcsövekkel galaxisokat figyelt meg. 1929-re Hubble már két tucat galaxis távolságának és vöröseltolódásának elemzésével végzett.⁴⁹ Itt Hubble egy nagy felfedezést tett: a galaxisok a tőlünk mért távolságukkal arányos sebességgel távolodnak tőlünk. (A vöröseltolódás alapján ki tudta számítani a távolodási sebességet, a távolságot pedig a Leavitt-szabály alapján kapta meg.) Egyenes arányosság van a sebesség és a távolság között. Az arány neve Hubble-állandó, az arányosságot kifejező képletet pedig Hubble-törvénynek nevezik. A törvény egyetlen logikus magyarázata az lehet, hogy a világegyetem egésze tágul, mint egy éppen sülő mazsolás kuglóf.

⁴⁹ A legtöbb galaxisban vöröseltolódás volt megfigyelhető – ezek tehát *távolodnak* tőlünk. Néhány viszonylag közeli galaxisban viszont kékeltolódást észleltek, vagyis ezek közelednek hozzánk. Ez a jelenség azonban nem cáfolja az általános tágulást, ami vagy annak a következménye, hogy a Tejút vonzza ezeket a galaxisokat, vagy az történik, hogy azok véletlenszerű mozgásuk során most éppen közelednek hozzánk.



A Hubble-törvény megváltoztatta a világegyetemről alkotott képünket. A statikus modellek kora lejárt. És ha a világegyetem egyenletes ütemben tágul – és ez valószínűnek tűnt azon adatok alapján, amelyeket Hubble gyűjtött a viszonylag közeli galaxisokról – az Einstein egyenletében lévő kozmológiai állandóra nincsen szükség. Einstein 1931-ben Kaliforniában járt, a csillagász számításai áttekintése után arra a következtetésre jutott, hogy egyenletének kozmológiai állandója szükségtelen, és ezért hivatalosan is megvált tőle. De Einstein már azelőtt is, hogy Hubble bejelentette felfedezését a világegyetem tágulásáról, pusztán elméleti megfontolásokból, elégedetlen volt a kozmológiai állandóval. Kozmológiai állandót tartalmazó egyenlete ugyanis lehetővé tette volna a világegyetem két másik modelljét is.

Alexander Friedmann (1888-1925) Szentpéterváron született, meteorológiát és matematikát tanult. Az általános relativitáselmélet akkor kezdte érdekelni, amikor az Orosz Tudományos Akadémián dolgozott. Einstein egyenleteinek tanulmányozásakor úgy döntött, hogy elveti a feltételezést, hogy a világegyetem statikus, de megtartja Einstein másik két feltételezését: a világegyetem tehát homogén és izotropikus. Friedmann az egyenletek megoldása során rájött, hogy egy ilyen világegyetemben nincsen szükség a kozmológiai állandóra. Einstein úgy gondolta, hogy Friedmann modellje hibás – tehát az egyenlet megoldása során valamit elhibázott – és meg is írta neki. De rá kellett jönnie, hogy ő követett el hibát, Friedmann megoldásának ellenőrzése során, és

visszavonta ellenvéleményét, Friedmann munkáját pedig „tisztázó”-nak nevezte. Ez volt a második megrázkódtatás, ami Einsteint a kozmológiai állandó miatt érte. Utána következett egy George Lemaître nevű belga pap és matematikus. Ő 1927-ben tudomást szerzett Slipher első megfigyeléseiről, amelyeket a vöröseltolódással kapcsolatban végzett, és ennek alapján megalkotta egy táguló világegyetem modelljét.

Hermann Weyl (1885-1955) és Einstein 1923-ban azt vizsgálták, mi történik a részecskékkel a de Sitter-féle világegyetem-modellben, és azt találták, hogy ezek távolodnak egymástól. Einstein ennek hallatán így írt Weylnek: „Ha nincsen kvázistatikus világ, akkor le a kozmológiai állandóval!”⁵⁰

⁵⁰ Abraham Pais: *Titokzatos az Úristen (Subtle is the Lord)*, New York: Oxford University Press, 1982, 288. oldal.

12. *A tér tágulása*

„A világegyetem szabad préda.”⁵¹

Alan Guth

Igen kevés ember van, aki a legapróbb részletekig érti Einstein általános relativitáselméleti egyenleteit. Ezek egyike Steven Weinberg, a Nobel-díjas fizikus, nagy hatású monográfiájában, amelynek címe *A kozmológiai állandó problémája*, ezt írta: „Sajnos nem volt elég egyszerűen elhagyni a kozmológiai állandót, mert bármi, ami a vákuum energiasűrűségéhez hozzájárul, éppen úgy viselkedik, mint egy kozmológiai állandó.”⁵² Einstein a kozmológiai állandó bevezetésével egy új matematikai eszközt hozott létre a tudomány számára – amelyet még ő sem tudott később visszavenni. Csak az maradt kérdéses, hogy az új találmányt a fizikusok és a kozmológusok fel tudják-e használni a világegyetemről alkotott elméletekhez.

Ha a kozmológiai állandó pozitív, akkor egy taszítóerő száll szembe a tömegvonzással. Einstein az állandót azért vezette be, hogy valami megtartsa az egyenletei szerint befelé összeomlani készülő világegyetemet. Tulajdonképpen mesterségesen létrehozott egy erőt, amely nem engedi összehúzódni a világegyetemet. Így tehát, amikor kiderült, hogy a

⁵¹ Eredetiben: „*The universe is the ultimate free lunch.*”, azaz a Világegyetem a valódi potyavacsora. Ezzel Guth arra utalt, hogy a pozitív energiák (tömeg és sugárzás) lehet, hogy tökéletesen kiegyensúlyozzák a gravitációs mezők negatív energiáját, így a Világegyetem összenergiája valójában nulla. Potyavacsora vagyunk. Sajnos a fordítás átfogalmazásában elveszett az eredeti mondanivaló. (E)

⁵² Steven Weinberg: *A kozmológiai állandó problémája (The Cosmological Constant Problem)*, Morris Loeb Lectures in Physics, Harvard University 1988.

világegyetem tágul, Einstein kivette az egyenletből a kozmológiai állandót.

Amikor Alexander Friedmann szakított Einstein feltételezésével, hogy a világegyetem statikus, és Einstein eredeti téregyenletének megoldásául egy táguló világegyetemet kapott, új fejezetet nyitott a modern kozmológia történetében. Itt volt az ideje, hogy Lemaître és mások feltegyék a magától értetődő kérdést: Ha a világegyetem tágul, ez a folyamat mikor kezdődött? Az ösztönös válasz erre az lenne, hogy valamikor a távoli múltban a világegyetem nagyon-nagyon kicsi, forró és sűrű volt. Ebből a kicsi és sűrű anyag- és energiacsomóból egy gyors változással keletkezett a világegyetem. Fred Hoyle, egy cambridge-i kozmológus az 1940-es végén egy rádióelőadásban „Big Bang”-nek, ősrobbanásnak nevezte el ezt a hihetetlen erejű hirtelen kiterjedést, amely elindította világegyetemünket a tágulás útján.

A téridő görbülete az adott objektum tömegével arányosan nő, ezért, amikor a világegyetem még nagyon kicsi volt, a tér görbülete óriási lehetett. Amikor az egész világegyetem még csak egy pont volt, az idő sem telt, mivel ebben a pontban – a téridő szingularitásában – a tömegsűrűség végtelen, és a tér és az idő elméletei nem alkalmazhatóak. Az idő fogalma a szingularitási pontban nem értelmezhető. Lemaître a világegyetem kezdőpontját ezért egy „tegnap nélküli napnak” nevezte.

Az oxfordi egyetemen dolgozó Roger Penrose 1965-ben megjelentetett egy cikket, amelyben topológiai fogalmakkal írja le, hogy egy nagy tömegű objektum hogyan tud egy pontra összezsugorodni – összeomlani saját súlya alatt. Ennek eredménye mindig egy fekete lyuk lesz; ezt a folyamatot először Karl Schwarzschild úttörő munkájából ismerhette meg a világ, aki Einstein téregyenletének első megoldója volt, és aki bevezette a ma Schwarzschild-sugár néven ismert fogalmat. Ez az a méret, amelynél ha kisebb egy csillag valódi sugara (ezt a

csillag tömege határozza meg), akkor a csillag egy ponttá zsugorodik. A Schwarzschild-sugár a kritikus pont – minden objektum, vagy fénysugár, amely egy olyan fekete lyukba kerül, amely ez alá az érték alá esik, örökre elvesz. Penrose bebizonyította, hogy a fekete lyuk közepén van egy különleges pont. Ez a pont a téridő szingularitás. Itt végtelen a görbület, és az idő megszűnik.

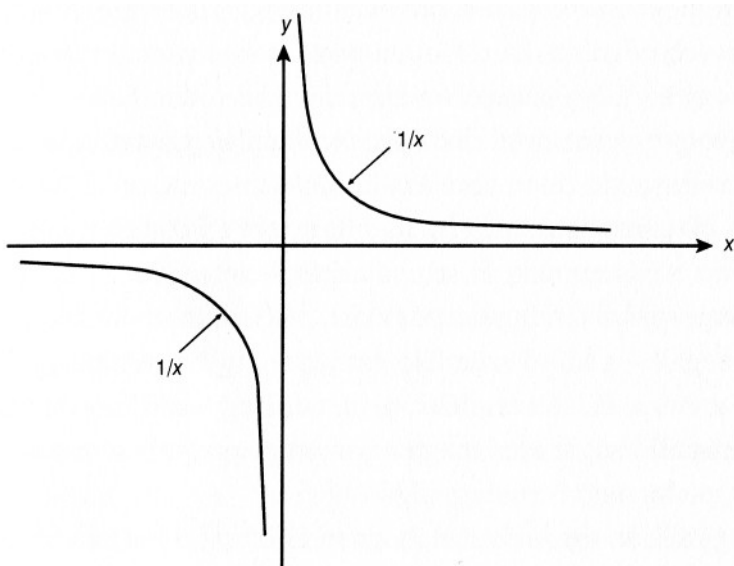
Penrose ragyogó meglátásának az a következménye, hogy egy csillag tömegösszeomlása során el kell, hogy jusson egy olyan állapotra, amelyből nincs kiút. Matematikai nyelven ezt úgy lehet mondani, hogy a csillag belsejében egy *zárt felület* keletkezik, és amint egyre gyorsul a visszafordíthatatlan összeomlás, az eredmény a szingularitás lesz: az a pont, ahol az általunk ismert matematika és fizika nem alkalmazható. Még ha a csillag nem tökéletesen gömb alakú, akkor is összeomlik, és szingularitás következik be.⁵³ Egyébként az idő már sokkal a szingularitás előtt, a Schwarzschild-sugár elérésekor megáll – a külső szemlélő ezt látja. Így ha valaki egy fekete lyukba esne, a külső szemlélő azt látná, hogy az illető megfagy a Schwarzschild-sugár által meghatározott gömb felületén. A szegény áldozat pedig nem is tudna magáról.⁵⁴

Az a gond a szingularitással, hogy az általunk ismert matematikai és fizikai fogalmakkal nem igazán írható le. Matematikai értelemben az a szingularitás, amikor valami „kóros” dolog történik. Egy egyszerű példával megérthetjük. Ha az $y = f(x)$ egyváltozós függvényre gondolunk, ez lehet egy „jölfésült” függvény: sima és folytonos, differenciálható (tehát meg lehet állapítani a függvény minden egyes pontján a

⁵³ Roger Penrose, *Gravitációs összeomlás és téridő szingularitások* (*Gravitational Collapse and Space-Time Singularities*), Physical Review Letters, 1965. január 18. 57-59. oldal.

⁵⁴ Ezt a lenyűgöző jelenséget teszi világossá Leonard Susskind élvezetes cikke: „A fekete lyukak és az információs paradoxon” (Black Holes and the Information Paradox) a Scientific American folyóirat 1997. áprilisi számában (52-57. oldal).

változás mértékét). De vegyük például az $y = 1/x$ függvényt. Ha $x = 1$, $y = 1$; ha $x = 2$, $y = 1/2$, ha $x = 1/2$, $y = 2$, ha $x = -2$, $y = -1/2$. De mi történik, amikor $x = 0$? Itt a függvény nincsen definiálva. Máris elhagytuk az ésszerűség, sőt az ép ész birodalmát. Az y értéke *a végtelen* lesz? Ugyanígy lehetne „mínusz végtelen” is! És még ha meg is állapodnánk, hogy legyen végtelen, mennyi a deriváltja? A derivált itt már nem létezik, bár az $x = 0$ akármilyen kicsi környezetében még igen.



Egy fekete lyuk közepében (a világegyetem kezdőpontjában) minden törvény érvényét veszti, ugyanúgy, ahogyan az $y = 1/x$ függvény nem értelmezhető az $x = 0$ helyen. A gravitáció végtelen, a téridő görbülete végtelen, az idő megáll.

Penrose fordítva érvelt – ez nem ütközik az általános relativitáselmélet törvényeibe – az összeomlástól a tágulás felé. Így, ha a „filmet” visszapörgetnénk az összeomlás pillanatától, akkor azt látnánk, hogy a világegyetem *egy fehér lyukból* származik – egy téridő szingularitásból. Mivel ezen a ponton a matematika és a fizika nem működik, és nem tudjuk, mi történik

a robbanás előtt, ha feltételezzük, hogy akkor keletkezett a tér és az idő, a világegyetem kezdetéről szóló elméletek általában az ősrobbanás utáni másodperc első kis töredéke eltelte után kezdődnek. Itt lényegében két megközelítést ismerünk.

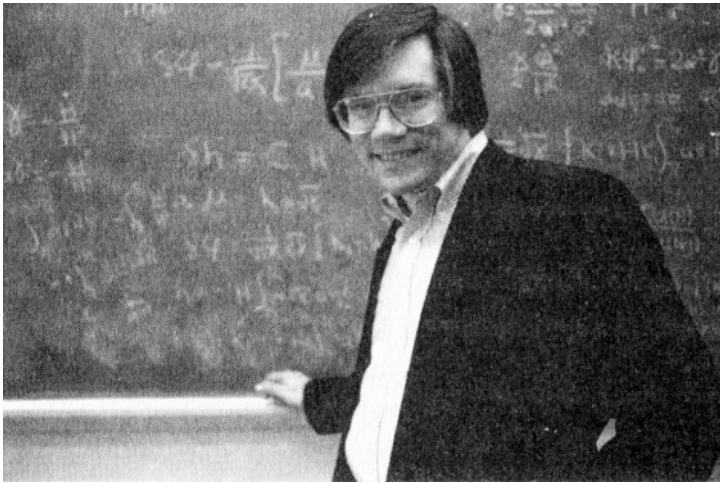
A szokványosabb ősrobbanási elmélet azt állítja, hogy a hatalmas robbanás után a tér tágulni kezdett. Egy kicsit később létrejött a barionanyag; ez az általunk ismert anyag őse, protonok, elektronok, neutronok, mind egy nagyon forró őslevesben, amely a tágulás során lassan hűlni kezdett. Ez a korai világegyetem a nagy sűrűség miatt nem volt átlátszó, hiszen a fotonsugárzás elnyelődött, majd újra kibocsátódott. A világegyetem csak körülbelül 300 000 éves korára lett elég átlátszó ahhoz, hogy a fotonok egyenes vonalban haladhassanak. A korai világegyetemet behatárolta átlátszatlansága.

Ha az egyre erősebb távcsövekkel egyre távolabb tekintünk az űrbe, ezzel *időben* is egyre hátrébb látunk, amíg el nem érünk egy határt. Ha távcsöveinkkel 14 milliárd fényévyire látnánk, akkor semmit nem látnánk. A legtöbb becslés a világegyetem korát 12 és 14 milliárd év közé teszi, így a 14 milliárd évvel ezelőtti időpont valamikor az ősrobbanás körül 300 000 éves környezetében lehet. De 300 000 éves korában a világegyetem még átlátszatlan volt, ezért ilyen távolságban, vagy ennél messzebb semmit sem látnánk.

Az ősrobbanás után kb. egymilliárd évvel megjelentek az első csillagok és galaxisok. Utána kialakultak a galaxishalmazok és szuperhalmazok. A világegyetem tovább tágult, míg végül elérte mai méretét.

A *felfúvódó (inflációs) világegyetem elmélete* másképpen magyarázza a világegyetem fejlődését, mint a szokásos ősrobbanás-elmélet. Alan Guth fizikus, az MIT Weisskopf fizikusprofesszora 1979-ben megalkotta a felfúvódó világegyetem modelljét. Alan Guth a New Jersey-beli New Brunswickben született 1947-ben. Az MIT-n szerzett diplomát 1969-ben, majd ott szerzett fizikai doktori címet is 1972-ben.

Princetonban fizikát oktatott, a Columbia Egyetemen pedig kutatásokat végzett, majd részecskefizikával foglalkozott a Cornell Egyetemen. 1979 őszén egy évre elhagyta állását a Cornellen, hogy a Stanfordi Lineáris Gyorsító Központban dolgozzon. Decemberben ragyogó ötlete támadt. Guth is azt próbálta elképzelni, hogy mi történhetett az ősrobbanás utáni pillanatokban, és elméletével a kozmológia két nagy rejtélyét is megoldja: a laposság- és a horizontproblémát.



Alan Guth (Donna Coveney, MIT)

A laposságprobléma akkor merül fel, ha valaki azt hiedelmet támogatja a világegyetemmel kapcsolatban, hogy a világegyetem geometriája lapos (sík), vagy euklideszi. Guth és kozmológus elődei ezt a következtetést a világegyetem anyaga sűrűségével kapcsolatos becsléseikből vonták le. Kiszámították a világegyetem kritikus sűrűségét: azt a sűrűséget, amelyen a világegyetem sem nem omlik össze, sem nem távolna tovább állandó vagy gyorsuló sebességgel, hanem a táulás egyre lassulna, majd végül megállna. A tudósok szerint a világegyetem jelenlegi sűrűsége e kritikus érték közelében van (a „közelében” itt a kritikus sűrűség egy tört részét, vagy akár a

kétszeresét is jelentheti). Úgy jutottak erre az eredményre, hogy a becsléseiket arra az időre extrapolálták, amikor a világegyetem még nagyon fiatal volt. Véleményük szerint egy másodperccel az ősrobbanás után a világegyetem sűrűsége a kritikus sűrűséggel 15 tizedesjegyig megegyezett. Akkor viszont a világegyetem hihetetlenül lapos. De miért? A szokásos ősrobbanáselmélet erre nem ad választ.



Esther Hu

A szokásos ősrobbanás-elmélet másik nagy problémája a horizontprobléma. A horizont, csakúgy, mint a Földön, az a pont, amelynél távolabbra nem látunk. Relativitáselméleti kontextusban, ha egy fényjelet messzebből küldenek nekünk, mint ahonnan az meg tud érkezni, akkor azt a horizonton túlról küldték.

A Hawaii Egyetemen dolgozó Esther Hu és munkatársai 1998-ban arról számoltak be, hogy a világ legnagyobb távcsövével, a 9,8 méteres Keck-ikertávcsövek egyikével megpillantottak egy eddig túl távolinak bizonyuló galaxist. Ez a halvány galaxis mintegy 13 milliárd fényév távolságra van tőlünk. A világegyetem körülbelül 14 milliárd éves. Tételezzük

fel, hogy Hu, vagy egy másik csillagász az égbolton az ellenkező irányba nézne, és megpillantana egy másik, tőlünk szintén 13 milliárd fényév távolságra lévő galaxist. Ez a két galaxis nyilvánvalóan *kívül esik egymás horizontján*. Miért? Mert a világegyetem csak 14 milliárd éves, és a fény az egyikből a másikba $13 + 13 = 26$ milliárd év alatt jutna el, ami ennek az időnek majdnem a kétszerese.⁵⁵ A fény tehát nem érkezik meg egyik galaxisból a másikba. Továbbá, a világegyetem tágulása miatt a két galaxis a fénysebességgel összemérhető sebességgel távolodik egymástól, és a fény ezért soha nem jutna el az egyik galaxisból a másikba.

A horizontproblémát a kozmikus háttérsugárzás tanulmányozása vetette fel. Hogyan lehet ez a sugárzás ennyire homogén (1 a 100 000-hez), ha minden egyes irányból érkezik? Mivel a különböző irányban elhelyezkedő pontok nem „látják” egymást, amikor egymás horizontján kívül kerülnek, nem állhat fenn közöttük olyan információcsere, amelynek az eredménye homogenitás lehetne.

Ezen jelenségek magyarázatára alkotta meg Guth a felfúvódás-elméletet, amely azt mondja ki, hogy az első másodperc első töredékében a világegyetem hatalmas, exponenciális mértékben tágult. Guth kozmológiája egy, a részecskefizikusok által jól ismert mechanizmust idéz fel, amely megmagyarázhatja, hogy a korai világegyetemben egy különleges anyagforma olyan gravitációs taszítást hozhatott létre, amely a világegyetem tágulásának hajtóerejét jelentheti. Ez a tágulás tartja meg a tér homogenitását, és teszi lehetővé a horizontprobléma végső megoldását. Ugyanakkor az ezen erő által előidézett tágulás hatására a világegyetem el fogja érni a kritikus sűrűséget.

A felfúvódásnak több különböző formája is van. Az einsteini egyenlet kozmológiai állandója a felfúvódás-elméletet

⁵⁵ Itt és máshol is a milliárd évek nem fedik teljesen a valóságot a tér folyamatos tágulása miatt.

hihetőbbé tenné. Az is lehet, hogy a legújabb, a világegyetem gyorsuló tágulását alátámasztó eredmények megtárgyalására összegyűlt kozmológusokat az vezette vissza a kozmológiai állandóhoz, hogy szerették volna megtartani a lapossági feltételezést, és ezzel együtt a felfúvódáselméletet.

Alan Guthban először akkor merült fel a felfúvódó világegyetem gondolata, amikor a mágneses egypólusokat (monopólusokat) vizsgálta. E részecskéknek a *szokásos* mágnes két pólusával szemben csak egy pólusuk van. Némely elméletek szerint ilyeneknek létezniük kellene a világegyetemben – mégsem léteznek. Munkája a Higgs-mező elméletén alapult, amely elméleti eszközt gyakran használják a részecskefizikában. A Higgs-mezőt a gyakorlatban még nem észlelték, de némely tudós szerint ezzel magyarázhatók a természetben a nem tökéletes szimmetriák. Guth felfúvódó világegyetem-elmélete szerint világegyetemünk egy nagyobb, szuper-világegyetem része, és az ott jelenlévő vákuumingadozás eredményeképpen jött létre. Guth elmélete szerint elképzelhetőek más „gyermek-világegyetek” is, amelyek szintén az anya-világegyetemtől származnak. Még az is lehetséges, hogy egy szuperfejlett civilizáció laboratóriumi úton is létrehozhat ilyen gyermek-világegyetemeket.

Hogyan győződhetünk meg arról, hogy az ősrobbanás valóban megtörtént? Ha a galaxisok távolodnak egymástól, akkor régebben közelebb voltak. Ha ezt az elvet visszavezetjük az időben, akkor arra a következtetésre jutunk, hogy a kezdő időpontban minden együtt volt. De honnan tudjuk, hogy valóban így volt-e? Ha a világegyetem egy ősrobbanással kezdődött, és közvetlenül ezután elkezdte a kiterjedést, egészen a mai napig, akkor kezdetben nagyon forró volt, és azóta folyamatosan hűl. George Gamow, Ralph Alpher és Robert Herman elméleti fizikusok az 1950-es években azt állították, hogy az ősrobbanásról árulkodó sugárzások még fellelhetők a világegyetemben. Vagyis, ha a világegyetem az ősrobbanás kori

hihetetlenül magas hőmérsékletről folyamatosan hűl, akkor mostanra el kellett érnie egy mérhető hőmérsékletet.

A princetoni Robert H. Dicke és James E. Peebles az 1960-as években hasonlóan gondolkodtak, és ki is számították a fent említett sugárzás, az ősrobbanás okozta *feketetest-sugárzás* mértékét. A feketetest-sugárzást minden test kibocsátja az abszolút 0 fok hőmérséklet fölött. Ez a sugárzás észlelhető. A legjobb példa erre a meleg testek által kibocsátott infravörös sugárzás. De még a hidegebb testek is sugároznak, alacsonyabb energiaszinteken.

Amikor a fotonok kiszabadultak az őslevesből, és a világegyetem az ősrobbanás után mintegy 300 000 évvel elkezdett átlátszóvá válni, a fotonok egyenes pályákon kezdtek közlekedni, és ezt a tulajdonságukat máig megtartották. A Doppler-hatás miatt ezek a fotonok energiát vesztek. Jelenlegi energiaszintjüket – és így hullámhosszukat is – ki lehet számítani az elméletből.

1965-ben a Bell Laboratóriumok két rádiócsillagásza éppen ezt fedezte fel, anélkül, hogy ismerték volna az elméletet. Arno Penzias és Robert Wilson később Nobel-díjat is kaptak a mikrohullámú háttérsugárzás felfedezéséért. 1989-ben a NASA fellőtte a COBE (Cosmic Background Explorer, vagyis kozmikus háttérsugárzás-vizsgáló) műholdat, amelynek segítségével még pontosabb méréseket lehet végezni. A világűr bármely irányából meglepően hasonló sugárzási értékeket mértek; ez az érték 2,7 fokkal magasabb az abszolút 0-nál (2,7 °K). Ez a felfedezés a Hubble-törvénnyel együtt az egyik legfontosabb csillagászati tény, amely alátámasztja az ősrobbanás elméletét. A sugárzás egyenletessége valószínűleg a felfűvódó világegyetem elméletét támogatja. A csillagok, galaxisok és galaxishalmazok feltehetően az ősrobbanáskor és a korai világegyetemben bekövetkezett energiaegyenletlenségek következtében jöttek létre.

Az ősrobbanás-elmélet egy másik bizonyítéka a világegyetem kémiai elemeinek viszonylagos bősége. A tudósok kiszámították az elemek várható túlsúlyát az ősrobbanás-elmélet szerint. Az ekkor felszabadult energia szintje alapján a világegyetemben kb. 75% hidrogénnek és 25% héliumnak kellene lennie. Az összes többi elem (és a deutérium, a hélium-3 és lítium-7 izotópok) csak nyomokban lennének jelen a világegyetem összetevői között. Ezek a nehezebb elemek – amelyek a körülöttünk lévő világ, sőt a mi saját összetevőink (bár a hidrogén is testünk egyik fő eleme) – később jöttek létre, a csillagokban bekövetkezett nukleáris reakciók során. A világegyetem elemei keletkezésének tanulmányozása megerősítette ezt a feltevést. Ezek a kutatások tehát az ősrobbanás-elmélet bizonyítékának tekinthetők.

Az ősrobbanással kezdődött a világegyetem tágulása. Függetlenül attól, hogy ez a tágulás exponenciálisan kezdődött-e, ahogyan azt a felfúvódáselmélet állítja, vagy sem, a kérdés a következő: Milyen a kozmikus tágulás? Erre a legjobb analógiát az *Eredetek: A modern kozmológusok élete és világa* című könyvben találtam.⁵⁶ Vegyünk egy gumidarabot, és jelöljünk meg rajta mondjuk centiméterenként egy-egy pontot tollal. A tintapöttyök jelentsenek egy-egy galaxist. Most húzzuk szét a gumidarabot. Vegyük észre, hogy eközben a pontok távolodnak egymástól. A galaxisok közötti távolság tehát nő; 1 cm-nél nagyobb lesz. De mi történik két nem szomszédos ponttal? Ezek *még* gyorsabban távolodnak: a köztük lévő távolság gyorsabban nő. Ha a gumidarabot úgy húzzuk ki, hogy a pontok/galaxisok közötti távolság 2 cm legyen, akkor két másodsomszéd-galaxis most 4 cm-re lesz egymástól. Ez történik a kozmikus tágulás során is.

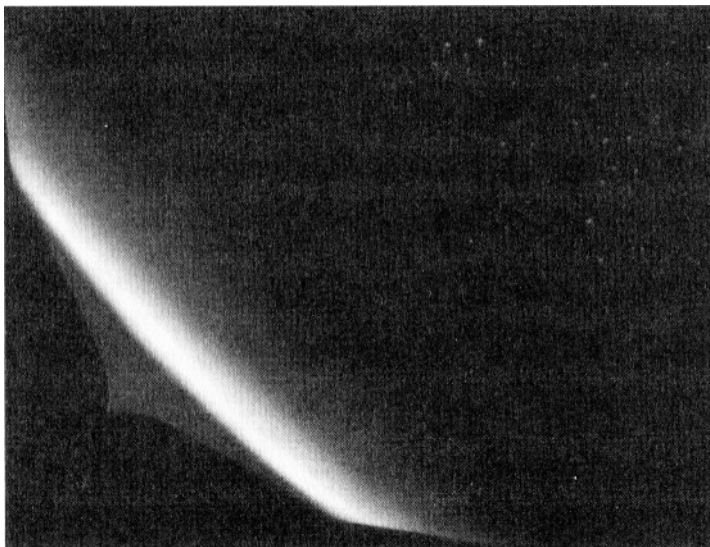
⁵⁶ Alan Lightman és Roberta Brawer, *Eredetek: A modern kozmológusok élete és világa (Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists)*, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1990, 8. oldal.

Amikor a tér tágul, a viszonylag közeli galaxisok lassabban távolodnak egymástól, mint a távolabbiaktól. Két galaxis között a távolodás sebessége távolságukkal arányos. Ez pedig éppen a Hubble-törvény.

Vegyünk észre egy másik fontos tulajdonságot is. A gumidarab kihúzásakor minden pont ugyanúgy távolodik szomszédaitól. Nincsen kiválságos pont: mindegyik tekinthető a tágulás középpontjának, amelytől az összes többi pont távolodik. A világegyetemnek sincsen középpontja és széle. Még ha azt is látjuk, hogy minden galaxis távolodik tőlünk, tudnunk kell, hogy ez bármelyik galaxisból így látszik – mindenki úgy érezheti, hogy a tágulás középpontjában áll.

Mi okozza a kiterjedést? Tér jön létre, vagy nyúlik meg. Az általános relativitáselméletből tudjuk, hogy a tér képlékeny; egy olyan alakítható közeg, amelynek a geometriáját megváltoztathatják a gravitációs hatások. A világűr nem olyan üres, mint amilyennek látszik. A világűr egy éppen sülő kuglófként tágul. Az Esther Hu és társai által felfedezett galaxis a fény sebességének 95,6%-ával távolodik tőlünk. Ez történik – legalábbis a Földről nézve – az innen látható legtávolabbi galaxisokkal. A hétmilliárd fényévnyire lévő a fénysebességnek körülbelül a felével távolodnak. Ha még közelebbi galaxisokat vizsgálunk, a tőlünk való távolodás sebessége kisebb.

Legjobban akkor érthetjük meg ezt a furcsa, nehezen hihető jelenséget, ha feltételezzük, hogy a világegyetem végtelen. Ha így van, akkor bármely pontja tekinthető középpontnak, és az itt lévő megfigyelő azt látná, hogy a közelebbi galaxisok lassabban, a távolabbiak gyorsabban távolodnak tőle, a távolságukkal arányos sebességgel. Egy kozmikus mazsolás kuglóf esetében minden mazsolaszem azt látná, hogy a többi mazsola a távolságával arányos sebességgel távolodik tőle. Ilyen *egyenletes* tágulás folyik az üres világűr közegében.



A világegyetem kialakulása

Illusztráció: ©Shigemi Numazawa

A távoli szupernóvákkal kapcsolatos új megfigyelések arra utalnak, hogy a tér nemcsak tágul, hanem gyorsulva tágul. Valami kifelé nyomja. Mi lehet ez az erő? A kvantumfizika szerint az űr, a vákuum – egyáltalán nem vákuum, hanem tele van energiával. Virtuális részecskék jelennek meg és tűnnek el az „űrben”. Rengeteg energia van odakint, amely úgy látszik, mintha üresség lenne; nem ismerjük ezt az energiát, és nem tudjuk, honnan jön. Olyan a vákuum, mint egy összenyomott rugó, amely ki akar tágulni. A láthatatlan rugó által gyakorolt nyomás miatt tágul a tér. De a rugó sokkal lassabban tágul, mint a tér, amelyet tágít, a tágulás tehát gyorsul. A vákuumenergia, a teret kifelé nyomó erő modellje: Einstein kozmológiai állandója.⁵⁷

⁵⁷ Ha a vákuum energiáját P_v -vel jelöljük, akkor Einstein kozmológiai állandója: $\lambda = 8\pi G P_v$.

13. *Az anyag természete*

Parányok a neutrínók,
Nincs töltésük, nincs tömegük,
Kölcsönhatással nem bírók.
A Földön, mint bolond bolygón
Átsuhannak gátak nélkül.
Nézem őket gondolkodón...

John Updike, 1960.

©1993 John Updike

Alfred A. Knopf Inc. engedélyével

A világegyetem természetének tanulmányozása során az érdeklő leginkább a tudósokat, hogy milyen az anyag összetétele. Mi az anyag? A világegyetemnek ez a fő összetevője, vagy másféle elemek is szerepet játszanak a világegyetem tulajdonságainak kialakulása során? Az általános relativitáselmélet felől, vizsgálva a kérdést, az anyag milyensége határozza meg Einstein T energia-impulzus tenzorát. Az anyag különbözőképpen viselkedik a huszadik század két fontos fizikai rendszerében: az általános relativitáselmélet, illetve a kvantumelmélet keretei között. Az általános relativitáselmélet az anyag (és a tér és az idő) „nagy léptékű” tulajdonságait határozza meg, míg a kvantumelmélet a „kis léptékűeket”. Az első egy teljesen determinisztikus elmélet, míg a második természete probabilisztikus: a kvantumok birodalmában a kérdésekre adott válaszok nem pontos számok, hanem valószínűségeloszlások. A kvantumelmélet, egyéb eredményei mellett, vezetett a korábban nem ismert anyagrészecskék felfedezéséhez.

Amikor a huszadik század elején felfedezték a kvantumelméletet, a fizikusok csak a neutronokat, protonokat és elektronokat ismerték. Utána felfedeztek egy érdekes fajtájú radioaktív bomlást, amelynek során a neutron egy elektront és egy protont bocsát ki. Wolfgang Pauli 1930-ban megvizsgálta a rendszer reakció előtti és utáni energiaállapotát, és ennek alapján azt feltételezte, hogy a reakció során egy eddig ismeretlen részecskének is fel kell szabadulnia. Egy évre rá az Amerikában élő, olasz származású Enrico Fermi a kilőtt részecskét neutrínónak (kis neutronnak) nevezte el. Úgy gondolták, hogy ez a részecske felelős a radioaktív bomlás után hiányzó energiáért.

A neutrínót töltés nélküli részecskeként ismerték meg, és 1998 júniusáig úgy gondolták, hogy tömege sincsen. Legalábbis soha senki nem mért neutrínótömeget. Fred Reines és Clyde Cowan 1956-ban felfedezte, hogy a Savannah folyó melletti nukleáris reaktor neutrínókat bocsát ki. Cowan 1995-ös halála után Reines Nobel-díjat kapott annak a részecskének a felfedezéséért, amelynek létezését elméletileg már negyedszázaddal korábban bizonyították. Valóban megtalálták tehát azt a részecskét, amelyet tulajdonképpen tudósok gondoltak ki, mert valami hiányzott a nukleáris reakciók végtermékeiből! A neutrínó története jó példa arra, hogy az elmélet és a matematika valóban alkalmas a tudás előmozdítására, és hogy ha egy jó elméleti tudós bízik saját feltevéseiben, az kísérleti sikereket is hozhat. De a neutrínó történetének ez csak a kezdete volt.

Amikor a tudósok kezdték alaposabban megismerni a magfúzió működését, biztosak voltak benne, hogy egy ilyen nukleáris reakcióból származik a csillagok energiája is. És ha a csillagok belsejében égő tűz valójában egy nukleáris fúzió, amely fantasztikus energiamennyiségeket szabadít fel, akkor a csillagok – a mi Napunkkal együtt – bizonyára neutrínókat bocsátanak ki. A tudósok úgy képzeltek, hogy a Földre

folyamatosan érkeznek a töltés nélküli, elhanyagolható tömegű részecskék, de elképzelhetetlenül kis méretük miatt úgy hatolnak át a Földön, mintha az ott sem lenne. Hogyan tudnák a tudósok észlelni ezeket a Napból jövő részecskéket?

Csak úgy volt esély a világűrből érkező neutrínók észlelésére, ha hatalmas, mélyen fekvő (például bányákban – azért kerültek a föld alá, mert itt jobban meg voltak védve a másféle sugárzástól) medencékben különböző fajtájú folyadékokat helyeztek el, és ott próbálták megfigyelni a neutrínók és a vízmolekulák (illetve egyéb molekulák) közötti kölcsönhatásokat. A Föld több pontján is folytattak ilyen kísérleteket. Az első olyan neutrínókat, amelyek a Földön kívüli forrásból származtak, egy dél-afrikai aranybányában, 1965-ben fedezte fel Fred Reines kollégáival együtt. Időközben találtak egy másféle neutrínót is, amelynek a neve müon-neutrínó, és a Brookhaven Nemzeti Laboratórium nukleáris reakcióinak melléktermékeként észlelték. A Stanfordini Lineáris Gyorsító Központban pedig felfedezték a tau részecskét, amelynek jelenlétéből egy harmadik típusú neutrínó létezésére következtek. Sóbányák medencéiben is folytattak neutrínókereső kísérleteket, és ezek sikerrel is jártak, eltekintve attól, hogy az elméletileg jósoltnál sokkal kevesebb neutrínót találtak, és nem értették, hogy miért.

Később kiderült, hogy az elmélet itt is megelőzte a kísérleti eredményeket. Az 1950-es évek vége felé egyre több fizikai elmélet született arról, hogy a neutrínók egy elképesztő tulajdonsággal rendelkeznek: képesek alakjukat megváltoztatni. A fizikusok ezt a jelenséget neutrínóoszillációnak nevezik. Így egy elektron-neutrínó müon-neutrínóvá vagy tau-neutrínóvá változhat (mindhárom név a nehezebbik részecskétől, tehát az elektrontól, a müontól illetve a tauontól származik). Ezek egyike könnyen észlelhető, de a többi nem. Így a tudósok arra a következtetésre jutottak, hogy a Napból jövő neutrínók

némelyike esetleg azért nem észlelhető, mert időközben megváltozik a típusa.

Az 1980-as évek végén hatalmas észlelőmedencék készültek az Egyesült Államokban (az Irvine-Michigan-Brookhaven kísérletet egy ohioi bányában folytatták le) és Japánban (a Kamioka Neutrínómegfigyelőben, a „japán Alpok” egyik cinkbányájában, Takayamától 45 km-re északra). Az utóbbi egy föld alatti, 47 000 m³-es vízgyűjtő medence volt, tele különlegesen tiszta vízzel, és körülveve nagy érzékenységgű fényérzékelőkkel, amelyek a kutatók reményei szerint érzékelni fogják azokat az egyszeri fényjeleket, amelyek a neutrínók és a vízmolekulák egy atomjának ütközéséből származnak. 1987-ben a déli féltekéről megfigyelhető volt egy szupernóva robbanás a Nagy Magellán-Felhőben; mindkét hatalmas neutrínóérzékelő kísérlet során találtak innen származó neutrínókat. A neutrínóknak tehát *át kellett hatolniuk a Földön* ahhoz, hogy az érzékelőkbe jussanak. Ezek voltak az első, bizonyítottan a Naprendszeren kívülről származó neutrínók, amelyek megjelenése a neutrínócsillagászat kezdetét jelentette.

1998. június 5-én elképesztő kijelentés hangzott el egy sajtókonferencián a japán Takayamában. A Kamioka Neutrínómegfigyelőben dolgozó 120 amerikai és japán fizikus kísérlettel igazolta, hogy a mindeddig megfoghatatlan neutrínónak mégis van tömege. A felfedezés távoli területeken is érezteti hatását, hiszen megváltoztathatja az anyagról, a világegyetem keletkezéséről és annak sűrűségéről alkotott eddigi elképzelésünket. A japán-amerikai vegyes csapat a neutrínók tömegével kapcsolatos következtetését abból a kísérletből vonta le, amellyel igazolni tudták, hogy a neutrínók valóban „átöltöznek”: az elektron típusú neutrínó müon vagy tauon típusúvá válik. A kvantumelmélet szerint erre csak olyan részecske képes, amelynek tömege van. A neutrínó tényleges tömegét még nem tudták megmérni. De a puszta tény, hogy rendelkezik ilyennel, azt jelenti, hogy megtaláltuk a

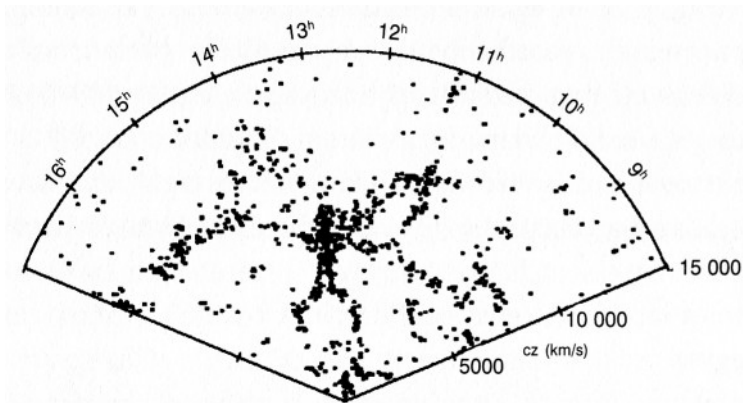
világegyetemből hiányzó tömeg egy részét. Mi is ez a „hiányzó tömeg”?

A csillagok galaxisokba tömörülnek. Egy galaxisban a csillagok a kölcsönösen kifejtett tömegvonzás miatt maradnak együtt. Ha egyre távolabb nézünk az űrben, meglepődve vehetjük észre, hogy a galaxisok nem véletlenszerűen helyezkednek el. Egy struktúra látunk kibontakozni. Az IBM kutatási központjában és a Yale Egyetemen dolgozó Benoit Mandelbrot néhány éve bebizonyította, hogy a galaxisok szerkezete egy fraktálhoz hasonlít – egy bonyolult elrendezéshez, amely határozottan nem véletlenszerű, még akkor sem, ha egyes pontokról szemlélve úgy tűnne. A galaxisok galaxishalmazokat alkotnak, amelyek szuperhalmazokba állnak össze, és így tovább, egyre nagyobb léptékben. A galaxishalmazok között nagy üres űrbuborékok vannak, amelyek mérete fényévmilliókban mérhető.

Az 1930-as évek végén a csillagászok észrevették, hogy a világegyetem „csomós”, vagyis, hogy a galaxisok halmazokat alkotnak. Az évek során azután egyre több adat gyűlt össze az anyag eloszlásáról az egyre nagyobb, ismert térben. 1986-ban a Harvard-Smithson Asztrofizikai Központ három kutatója: Margaret Geller, John Huchra és Valerie de Lapparent összeállította az északi félteke égboltjának mintegy egy 6000 galaxist feltüntető térképét. A térkép középpontja a Föld, a „tortaszelet” csúcsa, és a kiterjedése 650 millió fényév. A szerkezet szemmel láthatóan nem egyenletes, és felsejlik benne egy fraktáltermészetű elrendezés. Honnan származhat?

A világegyetem létrejötte utáni első pillanatokban történt kvantumhullámmásodások valószínűleg buborékokat alakítottak ki az anyagban, amelyek együtt nagybodtak a világegyetem tágulásával. A világegyetem anyagai által kölcsönösen kifejtett tömegvonzás alakíthatta ki a ma megfigyelhető galaxishalmazokat és -falakat. De amikor a tudósok a

galaxisokon belüli gravitációs hatásokat kezdték vizsgálni – tehát a galaxisokat összetartó erőket –, egy rejtélybe ütköztek.



Az Asztrofizikai Központ (CfA) © John Huchra és Margaret Geller vázlata az északi félteke égboltjának egy szeletéről

Minden, az asztrofizikusok által tanulmányozott galaxisban sokkal kisebbnek bizonyult a látható anyag (csillagok vagy gáz és por) tömege, mint amennyi a számítások szerint ahhoz kellene, hogy a galaxist a gravitáció egyben tartsa. Ebből csak arra lehet következtetni, hogy a galaxisok át vannak itatva valamilyen ismeretlen anyaggal, amely a galaxisok tömegének 90%-át teszi ki! Ezt a titokzatos, láthatatlan, de mégis jelen lévő anyagot „sötét anyagnak” nevezték el. Ez az anyag egyelőre még ismeretlen a tudomány számára. Nem barionikus – tehát nem atomokból és szubatomi részecskékből áll – hanem valami eddig soha nem látott. A sötét anyag természete a csillagászat egyik legnagyobb rejtélye.

Az anyag tulajdonságaiban rejlik a kozmológia kulcsa, világegyetemünk vajon az anyag által meghatározott, vagy van valami, aminek az anyagnál is fontosabb szerepe van a világegyetem múltjának és jövőjének meghatározásában? Ez az egyik legnagyobb kozmológiai kérdés. Vannak kozmológusok, akik kitartóan keresik a világegyetem további „hiányzó anyagát”

(a sötét anyagon kívül, amelynek létezésére a galaxisokra gyakorolt hatásából lehet következtetni). Azért biztosak a „hiányzó anyag” létezésében, mert ők a világegyetemet laposnak, tehát euklideszinek tekintik. Ahhoz, hogy ez igaz legyen, sokkal több anyagra van szükség a világegyetemben, mint amennyi látható, vagy amennyi a galaxisok gravitációjának tanulmányozásából kiszámítható. A legtöbb felfűvódó és hasonló kozmológiai elmélet „sík” geometriai modellje azon a feltételezésen alapszik, hogy a világegyetem sűrűségének van egy kritikus értéke, és hogy ha a valóban mért tömegsűrűség ezzel megegyezik, akkor a geometria „sík”.

Az ilyen nézeteket valló elméleti kutatók a hiányzó anyagot keresik. A neutrínó tömegének felfedezésekor felmerült, hogy esetleg ezzel megtalálták a hiányzó anyagot. De még ha a neutrínóknak van is tömegük – és jó sok neutrínó van szerte a világegyetemben – össztömegük akkor sem fedné le a hiányzó anyagmennyiséget. Tehát vagy vannak még valamilyen eddig ismeretlen, rejtett anyagok a világegyetemben, vagy a világegyetem tömegsűrűsége túl kicsi. Ha a világegyetem tömege kisebb a kritikusnál, akkor tágulásának semmi nem szab határt. Ha nagyobb, akkor a világegyetem összeomolhat a gravitációnak köszönhetően, és bekövetkezik a „nagy recs”, és utána talán majd keletkezik egy új világegyetem egy újabb ősrobbanásból.

A világegyetem tömegsűrűsége, az, hogy a világegyetemet az anyag vagy valami más határozza-e meg, és hogy megvan-e a hiányzó anyag: ezek a kérdések mind egy fontos fogalomhoz vezetnek: a világegyetem átfogó geometriájához. Einstein eredeti tétegyenletében azt tételezte fel, hogy a világegyetemet az anyag határozza meg. A kozmológiai állandó bevezetésével megnyílt egy másik magyarázat lehetősége. Az új modell magyarázatul szolgált mind a tömeg, mind a gravitáció hatására, és egy új jelenségre is – egy ismeretlen erő hatására, amely a gravitáció ellen dolgozik, az űr valamilyen

energiájaként van jelen a világegyetemben. Einstein egyenletei mindenképpen a tér természetével, azaz geometriájával foglalkoznak.

14. *A világegyetem geometriája*

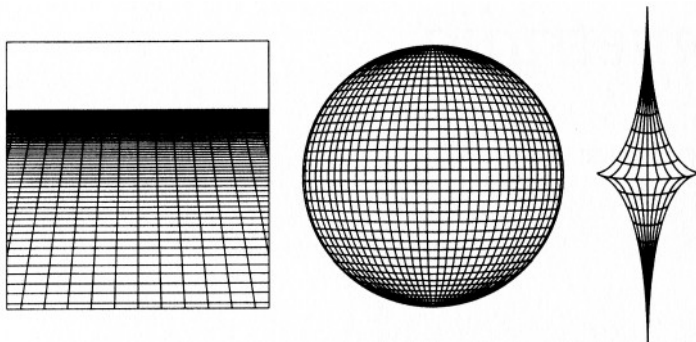
„Isten folyton geometrizál.”

Platón

Ezen a ponton fel kell tennünk egy érdekes kérdést: milyen a világegyetem átfogó geometriája? Tudjuk, hogy lokálisan, egy csillag vagy más nagy tömegű test közelében a tér görbül. A tér gömb alakban görbül az ilyen testek *körül*, amint ezt a napfogyatkozási expedíciók bizonyították. De milyen a világegyetem *egészének* alakja? Közvetlen összefüggés van a geometria és a matematikai egyenletek között. Einstein téregyenlete alapján képet alkothatunk a világegyetem geometriájáról.

Ha ismerjük a világegyetem geometriáját, meg tudjuk jósolni a jövőjét. A matematikusok három lehetséges geometriát tartanak a világegyetem egészére alkalmazhatónak. Az első a (lapos) sík, euklideszi geometria. Az euklideszi világegyetem térgörbülete definíció szerint 0. A görbület fogalmát Gauss vezette be, és a k betűvel jelölte. Ehhez azt kellett feltételeznie, hogy a világegyetem felületének görbülete *állandó*. Egy lapos világegyetemben tehát a görbület: $k = 0$. A *nemnulla* állandó görbülettel rendelkező felületek kétféleképpen lehetnek. A görbület lehet pozitív ($k = +1$) vagy negatív ($k = -1$). Egy $k = +1$ görbületű felület *zárt*. Kétdimenziós felület esetében ez egy gömböt jelent. Ha egy felület görbülete $k = -1$, akkor az *nyílt*, és geometriája hiperbolikus, mint a Bolyai-Gauss-Lobacsevszkij modellé. Itt a kétdimenziós felület egy

pszeudogömb külső felülete. A három állandó görbületű kétdimenziós modellt látjuk az alábbi ábrán.⁵⁸



Tekintsük most a négydimenziós téridőt, vagy úgy is fogalmazhatunk, hogy nézzük meg, hogyan fejlődött a háromdimenziós világegyetem az időben – mindezt a három lehetséges állandó görbületű geometria szempontjából. Meg fogjuk látni, hogy alakjuk alapján a kozmológusok miért a „lapos”, „zárt” és „nyílt” jelzőkkel határozzák meg a lehetséges világegyetemeket. Ehhez újra megvizsgáljuk Einstein téregyenletét, amely meghatározza a világegyetem geometriáját.

Einstein kozmológiai állandó nélküli egyenlete:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} R = -8\pi GT_{\mu\nu}.$$

De ha feltételezzük, hogy a világegyetem homogén, izotróp és görbülete állandó, akkor a fenti tenzoregyenlet (emlékeztetőül: $R_{\mu\nu}$ $g_{\mu\nu}$ és $T_{\mu\nu}$ tenzorok, ezért nem egyszerű számokat jelentenek, hanem egyszerre több elemet) a következő egyszerű, skaláris (tehát tenzorokat nem tartalmazó) differenciálegyenletté válik:

⁵⁸ A négydimenziós téridőben a relativitáselmélet különleges metrikájával határozhatjuk meg a távolságokat. Ebben a metrikában a negatív görbületű hiperbolikus térhez leginkább egy nyeregfelület hasonlítható.

$$(R'/R)^2 + k/R^2 = (8\pi G/3)\rho,$$

ahol ρ a világegyetem tömegsűrűsége. A differenciálegyenletek olyan egyenletek, amelyek az egyik változó szerinti deriváltat hozzák összefüggésbe más mennyiségekkel. Itt az R léptéktényező a világegyetem méretét jelenti. Deriváltja, R' a *világegyetem méretének változását* jelöli. Az egyenlet (Einstein téregyenletének egy „egyszerű világegyetemre” redukált változata – tehát egy olyan világegyetemé, amely mindenütt és minden irányban egyforma) változója R , a világegyetem mérete. Ez a modell egy tömeg által meghatározott világegyetemet ír le, tehát egy olyat, ahol a tömeg, és nem más energiaformák az uralkodó tényező. Ez teszi lehetővé, hogy Einstein általános energia-impulzus tenzora helyett egy tömeget mérő skaláris mennyiséget használjunk.

Amikor k lehetséges értékeit: 0-t, +1-et vagy -1-et helyettesítjük a fenti egyenletbe, akkor azt kapjuk, hogy a világegyetem ρ tömegsűrűsége a következő kifejezéssel lesz egyenlő, nála nagyobb, illetve kisebb: $(R'/R)^2/(8\pi G/3)$. Ez a mennyiség döntő fontosságú szerepet kap a kozmológiai modellekben. Az R elem, a világegyetem léptéktényezője méri a görbület sugarát, ha a világegyetem zárt, tehát van ilyen görbülete. Az R'/R mennyiség – a méretet jelentő mennyiség deriváltjának és magának a méretnek az aránya – egyenlő a Hubble-állandóval, amelyet H -val jelölnek, és amely a világegyetem tágulásának sebességét jelenti (a világegyetem méretéhez képest).

A teljes mennyiség: $(R'/R)^2/(8\pi G/3)$ a világegyetem kritikus sűrűsége. Láthatjuk, hogy amikor a sűrűség éppen ennyi, tehát ρ megegyezik a fenti mennyiséggel, akkor a görbület $k = 0$ – lapos világegyetemet kapunk. Ha ρ nagyobb a fenti mennyiségnél, akkor $k = +1$. Ez egy nehezebb világegyetem, amely előbb-utóbb befelé összeomlik. Ha ρ kisebb a kritikus sűrűségnél, akkor a geometria hiperbolikus, mivel $k = -1$. Itt

viszont nincsen elég anyag a világegyetem összetartásához – az örökké tágulni fog. Lapos világegyetem esetén is ez a helyzet, de ekkor a tágulás mértéke egyre csökken.⁵⁹

A kozmológusok el is nevezték a két sűrűség (a világegyetem egy adott pillanatban létező tömegsűrűsége, ρ és a fenti kifejezés szerinti kritikus sűrűség) arányát: ez Ω (ómega).

Az ómega a világegyetem geometriájának kulcsa. Ha nincsen kozmológiai állandó, a következő a helyzet. Ha $\Omega = 1$, akkor a sűrűség éppen megegyezik a kritikus sűrűséggel, és a világegyetem lapos – tágulása végtelen, de egyre lassuló.

Ha $\Omega > 1$, akkor a világegyetem tömegsűrűsége nagyobb a *kritikus* sűrűségnél, ami egyben tartja a világegyetemet, és a világegyetem tágulása lassul. Ekkor több tömeg van jelen, mint amennyi a tágulás lelassításához szükséges, és a világegyetem tágulása egy szép napon egyszer csak megáll, és a folyamat megfordul az elkerülhetetlen „nagy recss” irányába, amely azután mindent elnyel. Utána elképzelhető egy újjászületés, egy új ősrobbanás, és minden folytatódik tovább: mindig új világegyetem születik az előző poraiból.

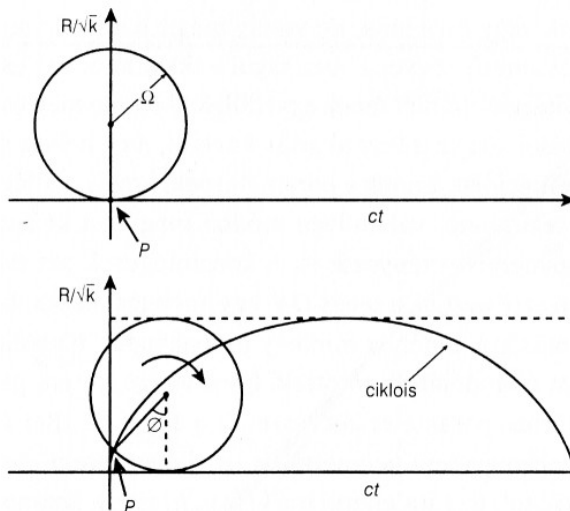
Ha $\Omega < 1$, akkor a világegyetem tömegsűrűsége kisebb a kritikus sűrűségnél. Nincsen jelen elég tömegmennyiség a tágulás megfékezéséhez és az összeomláshoz, a világegyetem tágulása örökké folytatódik. Geometriája hiperbolikus.

A világegyetem sorsa a fenti három esetben akkor is különböző lesz, ha a kozmológiai állandó értéke nem nulla, de akkor nem csak Ω , hanem λ értékétől is függ.

A világegyetem geometriája attól függ, hogy a háromdimenziós világegyetem hogyan alakul az időben. Egy gömb alakú világegyetem, amely kitágul, majd összeomlik – ahol $\Omega > 1$ – ciklois görbét ír le, ha a vízszintes tengelyen az időt ábrázoljuk (itt a világegyetemet minden egyes pillanatban egy kör jelöli; az egyik térbeli mennyiséget nem ábrázoljuk,

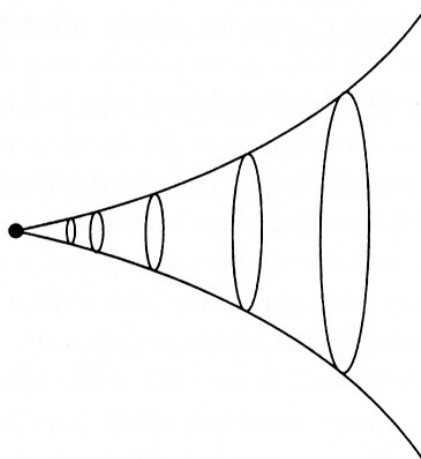
⁵⁹ Köszönettel tartozom Jeff Weeksnek a téregyenlet értelmezésében nyújtott segítségért.

hogy az ábra beleférjen a könyvbe). Itt látható egy ilyen világegyetem képe.



Egy lapos világegyetem, tehát egy olyan, ahol $\Omega = 1$, egyre lassulva tágul.

Egy $\Omega < 1$ tulajdonságú világegyetem egyre gyorsulva tágul, ahogyan azt az alábbi ábra mutatja.

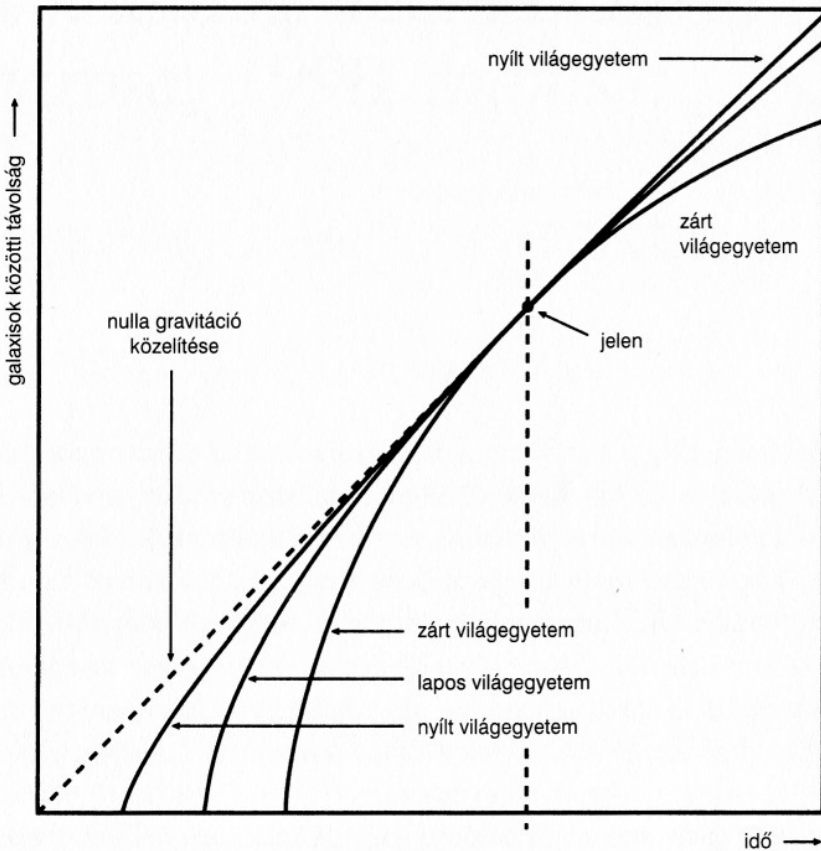


De mi van akkor, ha van még valami a világegyetemben, ami hatással van a tágulásra, a geometriára – az egész világegyetem sorsára? Ha van valamilyen „fura energia” valahol az űrben, amelyet nem látunk, érzünk vagy észlelünk, de amely mégis hatással van a téridő szövetére, és amitől az gyorsabban tágul – akkor az anyag és az általa keltett gravitációs erő nincsenek egyedül. Kell lennie még valaminek.

Ha a tudósok ezt az irányt akarták követni, meg kellett változtatniuk a Ω definícióját. Ennek a paraméternek, amely a világegyetem kulcsának tekinthető, valamilyen módon magában kellene foglalnia ezt az ismeretlen tényezőt is. A kozmológusok azt találták ki, hogy több részre osztják a teljes Ω -t: egy anyaggal kapcsolatos részre, és egy másikra, amelyet mintegy próbaképpen Einstein jó öreg kozmológiai állandójához kötöttek. Így a világegyetem geometriáját meghatározó paraméter két része: $\Omega = \Omega_M + \Omega_A$. Bár Ω meghatározza a világegyetem geometriáját, a világegyetem sorsa szinte kizárólag Ω_A -tól, a „fura energiától” függ. Einstein kozmológiai állandójának energiája olyan nagy erejű lehet, hogy ez esetleg a Ω_M értékétől függetlenül, önmagában is elég ahhoz, hogy a világegyetem korlátlanul táguljon tovább.

A Szupernóva Kozmológiai Projektet Saul Perlmutter és kollégái 1988-ban azért kezdték el, mert lehetségesnek tartották, hogy meg tudják majd határozni a világegyetem geometriáját és sorsát. Csillagászati megfigyelésekkel próbálták az ómega paramétereket meghatározni. Ehhez a „normálgyertyák” (Ia típusú szupernóvák) fénygörbéjét tanulmányozták. Végül a leleményes csillagászok a vártnál is közelebb jutottak a megoldáshoz. Többévi megfigyelés és számítás után világossá vált előttük, hogy valamilyen, a tudomány által soha nem tapasztalt nagyságú erő van jelen a világegyetemben. Az Ω_M értéke a vártnál jóval kisebbnek bizonyult. A robbanó csillagok a kozmosz túloldalán különös, fantasztikus dolgot bizonyítottak: nincsen elég tömeg a

világegyetemben ahhoz, hogy bármely tömegalapú elmélet igaz legyen, és egy láthatatlan erő lök egymástól egyre gyorsabban szét mindent. Einstein kozmológiai állandója és az ehhez kapcsolódó Ω_Λ mérhetetlen túlsúlyba került. De akkor milyen is a világegyetem?



A világegyetem három modellje, illetve lehetséges sorsa

15. *Illinois állam Batavia városa, 1998. május 4.*

„A világegyetem túl könnyű”

Neta Bahcall

Paul Steinhardt, a kozmológia fiatal tudományának egyik legfiatalabb létrehozója 1952-ben született, és 1978-ban doktorált a Harvard fizika szakán. Részecskefizikát tanult, de hamarosan a kozmológia felé fordult. Steinhardt a Pennsylvanai Egyetem tanára lett, és ott Guth felfúvódó modelljét tanulmányozta. Sok más tudóssal ellentétben Steinhardt nem vette készpénznek a felfúvódási modellt – meg szeretne volna őrizni tárgyilagosságát, és csak az adatok (csillagászati megfigyelések, a kozmikus sugárzás mérési adatai és más fizikai adatok) alapján akart dönteni. Hamarosan rájött, hogy az érdekes és ígéretes felfúvódási modellel elméleti problémák vannak. Ezek közül az első és legfontosabb az volt, hogy nem ismerjük, mi az az erő, amely a felfúvódást megállítja, hogy következhesen az a szelídebb ütemű tágulási időszak, amelynek mi is tanúi vagyunk.

Paul Andy Albrecht doktoranduszhallgatóval dolgozott, és együtt jöttek rá a megoldásra. Úgy vizsgálták újra Guth felfúvódó modelljét, hogy feltételezték, a tágulás – és az azt okozó erőter – lassabban nő, amely esetben még mindig a felfúvódással magyarázhatóak a fizikai jelenségek, de ugyanakkor megvan arra is az esély, hogy a folyamat egy bizonyos ponton megáll. Utána egy kiterjesztett felfúvódásnak nevezett modellt dolgozott ki, ahol egy másik erőter is

ellensúlyozza a gravitációs hatást. Elmélete szerint a világegyetem korai időszakában a gravitációs állandó értéke még nem annyi volt, mint ma. Így Einstein téregyenletének G tagja nem volt konstans a világegyetem hajnalán. Ekkor – a Planck-korszakban, amely az ősrobbanás utáni 10^{-44} másodperces időszakot jelenti – még érvényesültek a kvantumjelenségek. A világegyetemnek ebben az első pillanatában a kvantummechanika – a nagyon kicsi elmélete – határozta meg, hogy mi fog történni a világegyetemben, és Einstein klasszikus relativitáselmélete még nem lépett érvénybe. Új tudományterületre volt szükség. A kvantumkozmológia keletkezőben lévő tudománya sokat köszönhet Paul Steinhardtnak.

1995-ben Steinhardt megpróbálta összevetni a különböző forrásokból származó fizikai és csillagászati eredményeket, amelyek érzése szerint mind abba az irányba mutattak, hogy a világegyetem tágulása gyorsul. Ez viszont természetellenesnek tűnt. Miért működne így a világegyetem, ha egyszer a világegyetem egyetlen nagy hatótávolságú erője, a gravitáció elmélete szerint az ősrobbanáskor kezdődő tágulásnak lassulnia kellene, hiszen a világegyetemben jelen lévő anyagok vonzzák egymást?

A legújabb kozmológiai eredmények ismeretében 1997 szeptemberében Paul Steinhardt úgy dönt, hogy itt az ideje megbeszélni, mi is zajlik a világegyetemben, és összehív egy nagy találkozót, amelyen részt venne több, a kozmológiához kapcsolható tudományág képviselője is: csillagászok, asztrofizikusok, kísérleti fizikusok, részecskefizikusok, alkalmazott matematikusok és mások. Vajon a különböző területeken dolgozó tudósok hogyan értelmezik az új eredményeket, és mire következtetnek belőlük? Steinhardt úgy gondolta, hogy a legjobb helyszín a Fermi Nemzeti Részecskegyorsító Laboratórium (röviden: Fermilab) lesz az illinoisi Bataviában. Itt már több fontos kísérletet végeztek

annak érdekében, hogy megvizsgálják, hogyan viselkedhetett az anyag a világegyetem kezdetén. Az itt dolgozó Joshua Frieman és Steinhardt együtt kezdtek az 1998. májusi konferencia szervezéséhez.

A *Nature* folyóiratban 1998 januárjában megjelent egy cikk Perlmutter és a Szupernóva Kozmológiai Projekt adatairól, amelyeket nyolc szupernóva megfigyelése alapján gyűjtöttek.⁶⁰ Az adatokból úgy tűnt, hogy a térben és időben távolabbi galaxisok, például a csoport által tanulmányozott nyolc, lassabban távolodnak tőlünk, mint a közeli galaxisok. A csoport előtt állt még hatvan galaxis Ia típusú szupernóváinak elemzése. Vajon a fent említett jelenséget támasztják majd alá az újabb adatok? Ha igen, ez azt jelenti, hogy a világegyetem a mi időnkben gyorsabban tágul, mint régebben.

Az Amerikai Csillagászati Társaság 1998. januári, washingtoni ülésén Perlmutter projektje bemutatta eredményeit, amelyek arra utalnak, hogy a világegyetem egyre jobban tágul. A rivális Harvard-Smithson szupernóva-kutató csoport később arról számolt be, hogy egyes eredményeik igazolják Perlmutter feltevését. Két princetoni csapat, Ruth Daly, illetve Neta Bahcall vezetésével, szintén hasonló eredményekről számolt be. Ők is azt állították, hogy a világegyetem össztömege kevés a tágulás korlátok közt tartásához.

Neta Bahcall Izraelben született és nevelkedett. Matematikát és fizikát tanult a Héber Egyetemen, és 1964-ben nukleáris fizikából diplomázott a Weizmann Intézetben. Ugyanebben az évben ismerkedett meg jövődöbelijével, John Bahcall-lal, aki a Caltech (a Kaliforniai Műszaki Egyetem) fizikusprofesszoraként meglátogatta a Weizmann Intézetet. A következő évben összeházasodtak, és Neta a Caltechen

⁶⁰ Perlmutter, S. és a többiek: *Egy szupernóva-robbanás felfedezése, amely a világegyetem korának felénél történt (Discovery of a Supernova Explosion at Half the Age of the Universe)*, *Nature*, 391. kötet, 1998. január 1., 51-54. oldal

nukleáris asztrofizikai doktori értekezésén dolgozott William Fowler felügyelete alatt (aki néhány évvel később Nobel-díjat kapott). Neta kutatásai a csillagok belsejében bekövetkező nukleáris reakciókra összpontosultak, amelyeknek a csillagok a fényüket köszönhetik. 1970-ben megkapta a doktori fokozatot a telavivi egyetemtől. Ekkor már nagyon érdekelte a csillagászat, és több közös kutatási programban is részt vett a Caltech asztrofizikusaival, akik kvazárokat és más csillagászati jelenségeket tanulmányoztak.



Neta Bahcall

(fényképezte R. P. Matthews, Princeton Egyetem)

1972-ben a Bahcall házaspár a nemrég elkészült az izraeli negev-sivatagi Wise Csillagvizsgálóban nézte a csillagokat. Szállásuk a csillagvizsgáló közelében volt, de nem volt kire hagyni a gyerekeket, így magukkal hozták a hároméves Safit és a még nem egészen egyéves Dant, és a csillagvizsgálóban talált fiókokban ágyaztak meg nekik. A gyerekeik már aludtak, amikor Neta és John Bahcall felfedezte az első pulzáló kettős

optikai rendszert, amely ugyanaz, mint az első, műhold által érzékelt pulzáló röntgenforrású kettős rendszer. A tömör objektum, amelynek a gáza a röntgensugarakat kibocsátja, egy pulzár – az első kettős pulzár. Ez nagy szenzáció volt a csillagászatban. Ez volt az új csillagvizsgálóban tett első felfedezés, és az izraeli állam Neta Bahcallt Az év tudósnoijének választotta.

Bahcallék Princetonba költöztek, ahol Neta most az egyetem asztrofizika-professzora, John pedig a Felsőfokú Tudományok Intézete (Institute of Advanced Studies) természettudományi professzora, őt 1998-ban Clinton elnök a Nemzeti Tudományos Éremmel tüntette ki. Neta Bahcall hat évig volt az Űrtávcső Tudományos Intézet (Space Telescope Science Institute) tudományos hivatalának vezetője, ahol eldöntik, hogy a Hubble-űrtávcső milyen fontos csillagászati megfigyeléseket tegyen. Az évek során érdeklődése egyre inkább a kozmológia felé fordult, és azt kutatta, hogy az asztrofizikai felfedezések segítségével hogyan fejthető meg a világegyetem szerkezete, kezdete, kora, és további sorsa. Neta Bahcall éveken keresztül tanulmányozta a világegyetem nagyléptékű szerkezetét, és megpróbálta megválaszolni a kozmológia nagy kérdéseit. Kutatása sok eredményt hozott, és felfedezései elismeréseképpen 1997-ben az Egyesült Államok Nemzeti Tudományos Akadémiájának tagjává választották.

Az Amerikai Csillagászati Társaság 1998. januári ülésén Neta Bahcall bemutatta eredményeit, amelyek a kollégáival együtt végzett vizsgálatokon alapultak, és amelyek célja az volt, hogy több, egymástól független módon lemérjük a világegyetem tömegét. A kutatók galaxishalmazokban vizsgálták a világegyetem anyagának fejlődését és eloszlását. Az egyik módszer Einstein gravitációs-lencsehatásán alapult. Itt a távoli galaxisok fényének elgörbülését vizsgálták, ami a Föld és köztük lévő galaxisok környékén játszódik le; a fényelgörbülés mértéke alapján meg lehet becsülni a közelebbi

galaxis tömegét. Más módszerek a galaxisokban megtalálható forró gázok vizsgálatából indultak ki, vagy a sebességből, a vöröseltolódásból, illetve a tömeg és a fény arányából. Bahcall tanulmányozta a galaxisok fényudvarát, ahol kutatása szerint a világegyetem sötét anyagának nagy része elhelyezkedik. Neta Bahcall arra a következtetésre jutott, hogy a világegyetem sűrűsége csak mintegy 20%-a annak a sűrűségnek, amely megállítaná a tágulás ütemét, de nem vezetne el az összeomláshoz. Ezt az értéket több különböző kutatási módszerrel, egymástól függetlenül érték el. A következtetés helytelenségének valószínűsége körülbelül egy a millióhoz.⁶¹

A sajtóban sok szó esett Perlmutter, Bahcall és társaik meglepő felfedezéseiről. Az új tények megragadták a világ képzeletét. Úgy látszott, hogy mindenki – tudósok és laikusok egyaránt – „korlátos” világegyetemet szeretne, esetleg valami, Einstein statikus modelljére emlékeztető világot. Ha a világegyetem valóban tágul, és nem változatlan – és ezzel Hubble már az 1920-as években meglepte a világot – akkor az emberek legalább azt szerették volna látni, hogy a világegyetem a kiterjedés és az összehúzódás között oszcillál. Egy felváltva kiterjedő és összehúzódó világegyetemben megmarad a végső megújulás esélye, ha a félelmetesen távoli jövőben is... Egy korlátlanul táguló világegyetem, amelyben remény sincsen az újbóli összehúzódásra, majd egy újabb ősrobbanásra, nem túl biztató forgatókönyv. Ez lehetett az egyik oka annak, hogy a Fermilabban tartott májusi összezejövetelen a sajtó is jelen volt.

A Fermilabban összegyűlt tudósokat még a végtelenné táguló világegyetemnél is fontosabb kérdés foglalkoztatta: a fizika sorsa. A tudósoknak azzal a szinte elkerülhetetlen következtetéssel kellett szembenézniük, hogy a világegyetemben valami nagyon furcsa dolog történik, valami, amit egyikük sem ért. A természet egy ötödik erőt is csatasorba

⁶¹ A statisztikai valószínűségi értéke kisebb mint 10^{-6} .

állított, de ezt az erőt még senki nem tapasztalta. Ez az érzés, amelyben a fizikusok, a részecskeelmélettel foglalkozók és a csillagászok mindannyian osztoztak, egyre erősödött az eredmények elemzése hallatán. A tudósnak az a dolga, hogy kételkedjen; bizonyítékokat szerettek volna, mielőtt elvetik a régi elméleteket, hogy helyet készítsenek az újnak. Amikor mind együtt voltak, összesen hatvan tudós, megkezdődtek az előadások.

William Press, a Harvard-Smithsonian csoport egyik csillagásza, magára vállalta az ördög ügyvédjének szerepét csapatával és a Berkeley-csapattal szemben, miután a két szupernóva-kutató csoport bemutatta eredményeit. „Mi van, ha az eredmények nem igazak?” Ez volt a nagy kérdés. A másik csapat két tagja, Saul Perlmutter és Robert Kirshner az adatok védelmére kelt, amelyekkel kapcsolatban többféle kérdés is felmerülhetett. Először is, a szupernóvák valóban normálgyertyának tekinthetők?⁶² Honnan tudjuk, hogy egy hétmilliárd éve bekövetkezett Ia típusú szupernóva ugyanolyan fénygörbével rendelkezik, mint egy csupán félmilliárd éves? És ott volt még annak a korrekciónak a kérdése is, amelyet a csapatok a fényadatokkal kapcsolatban kényszerültek végezni azok összehasonlíthatósága érdekében. Jól sikerült a korrekció? Végül pedig ott volt az a meglepetés, amely a tanulmányozott galaxisokban érte a kutatókat: a por hiánya. Miért nem találtak port?

A két csapat hosszan tárgyalta a technikai részleteket, és láthatólag mindenki megalégedésére tisztázták a kényes pontokat. Próbaszavazást tartottak, és a tudósok nagy többsége tudományosan meggyőzőnek fogadta el az új adatokat. Nem volt tehát menekvés az elkerülhetetlen, régóta kísértő kérdés

⁶² 1999 tavaszára a tudományos lapokban több cikk is megerősítette a feltételezést, hogy a szupernóvák jó pontossággal normálgyertyának tekinthetők, és a kapott távolság- és sebességbecslések nagyon is megbízhatóak.

elől: mi okozza a világegyetem gyorsuló tágulását? A világegyetem össztömege inkább össze kellene, hogy húzza az egészet. Az ősrobbanáskor kezdődött tágulásnak le kellene lassulnia a világegyetem galaxisaiban elhelyezkedő anyag tömegétől. De az 1998 májusában a Fermilabban bemutatott bizonyítékok világosan azt mutatják, hogy ez mégsem így van. A világegyetemben nincsen elegendő tömeg ahhoz, hogy az lelassítsa a tágulást, sőt ellenkezőleg: azt valamilyen titokzatos *erő gyorsítja*. Valamilyen *negatív nyomás* van a vákuumban, valami olyan, ami idegen a tudomány számára. De vajon valóban így van-e?

„Van valami fura energia a világegyetemben” – írta a Fermilabban dolgozó Michael Turner a jegyzetfüzetébe. A szöveg köré csillagokat is rajzolt, fejüket vakaró embereket és a görög nagy Λ betűt. 1998. május 5-én rajza megjelent a New York Times tudományos mellékletének címlapján.

– Ami elég jó volt Einsteinnek, – mondta Turner a kozmológiai állandóra gondolva – legyen elég jó nekünk is.

De az új elméleteket, például a felfúvódási elméletet valló kozmológusok még egy lépéssel tovább akartak menni. A kozmológiai állandó elvileg képviselheti azt a titokzatos természeti erőt, amely kifelé nyomja a teret, dacolva a gravitációval, és a világegyetemet a végtelenségig tágítja. De a felfúvódási elmélet szerint egyszer régen, az ősrobbanás utáni első pillanattöredékben, jelen volt egy hasonló erő a világegyetemben, amely miatt a világegyetem exponenciális ütemben terjedt ki. Tehát a kozmológiai állandónak le kell írnia ezt az időszakot is. De van itt egy kis gond. A láthatatlan erő nagysága más volt abban a bizonyos rövid, ősi pillanatban, mint ma. Mit kezd a tudomány egy változó értékű Λ -val?

Ezt a fontos kérdést, amely megoldaná a modern kozmológia sok rejtélyét, legtermészetesebben úgy válaszolhatnánk meg, ha kozmológiai állandó helyett kozmológiai *változót* használnánk, amely az idő, vagy Einstein egyenlete más változóinak

függvénye lenne. De ennek pontos képletét senki sem tudja. Einstein már több mint négy évtizede halott, és úgy látszik, azóta senki nem vette a bátorságot, illetve nem támadt a megfelelő ösztönös megérzése, vagy nem volt elegendő tudása ahhoz, hogy megváltoztassa az egyenletet, amelyet pedig ő maga is megváltoztatott, amikor először bevezette a kozmológiai állandót.

Einstein követői, az általános relativitáselmélettel foglalkozó fizikusok idejüket Einstein téregyenletének megoldásával töltik. Ehhez a régi és új módszerek teljes fegyvertárát felvonultatják: számítógépen futtatott numerikus eljárásokat, vagy éppen komplex differenciálegyenletek elméleti levezetéseit. De valahogy nem akaródzik nekik az új eredményekhez igazítani Einstein egyenletét.

Einstein téregyenlete szent és sérthetetlen. Az egyenletet a nagy mester alkotta. Minden tenzornak, minden állandónak, minden kis elemnek célja van. A tenzoregyenlet a természet törvényeit rögzíti. Ezek a törvények nem változnak akkor sem, ha az ember egy fizikai folyamatot más szemszögből vagy más koordináta-rendszerben vizsgál. Határhelyzetben pedig a tenzoregyenlet kiadja az egyszerűbb newtoni törvényeket, amelyek nem relativitási környezetben használhatóak.

Einstein egyenletébe bele tudta foglalni a később már fekete báránynak tekintett mennyiséget a metrikus tenzor ravasz megcsavarásával; csak egy kicsit kellett még görbítenie a téren, és az egyenletbe belefért az állandó úgy hogy egyenletének megmaradtak azok a fontos tulajdonságai, amelyeken évekig dolgozott.

De egy puszta állandóból változót kreálni? Erre talán még maga a nagy mester sem lett volna képes. Így azoknak a kozmológusoknak, akik a világegyetem „fura energiáját” úgy szerették volna megmagyarázni, hogy közben a felfűvódási elméletet is megtartják, más megoldás után kellett nézniük: egy új elméletet kellett kidolgozniuk.

Paul Steinhardt volt az egyik alternatív modell atyja. Kvintesszenciának nevezte ezt el Arisztotelész ötödik természeti eleme után, ezzel utalt a természetben feltételezett ötödik erőre. A fizikusok által ismert első négy erő a gravitáció, az elektromágnesesség, illetve az erős és gyenge nukleáris erők. A kvintesszencia, amelyet még soha senki nem tapasztalt, lenne tehát az ötödik. Steinhardt most azon dolgozik, hogy hogyan építse be a kvintesszenciái Einstein téregyenletébe. Függetlenül attól, hogy melyik elmélet oldja majd meg a problémát, Steinhardt találóan foglalta össze a kozmológusokat most nagyon is foglalkoztató rejtélyt.

– A világegyetemben egy negatív nyomás működik – mondta nekem. – Egy dolog azonban már biztos, és ez az, hogy $\Omega_M < 1$. Mit jelent ez? Görbületet, kvintesszenciát, Λ -t? Nem tudjuk, de bármi is az, hatással van a fizika alapjaira.

16. *Isten egyenlete*

„Tudni akarom Isten gondolatait.”

Albert Einstein

Einstein kozmológiai állandója életben maradt, még ha megalkotója mossa is kezeit. Steven Weinberg monográfiájában elmeséli a nehezen megfogható konstans kalandjait.⁶³ Weinberg megmutatja, hogy az állandó Einstein egyenletében a vákuum teljes hatásos energiájához $1/8\pi G$ -t ad hozzá. Az a kérdés, hogy az állandó adja-e a vákuum teljes energiáját, vagy van esetleg valami más, ami kifelé nyomja a világegyetemet. És ha a teljes felelősség a kozmológiai állandóé, akkor az vajon mekkora?

Az 1960-as és 1970-es években a részecskefizikusokat azért érdekelte a kozmológiai állandó, mert meg kellett becsülniük az üres tér energiaszintjeit ahhoz, hogy megkülönböztethessék az ilyen energiát a gyorsítókban vizsgált részecskék energiájától. De akármilyen keményen próbálkoztak, az üres térben várt energia mennyisége nem egyezett semmilyen értékkel, amelyet a kozmológiai állandó segítségével számoltak ki. A részecskefizikusok fel is hagytak ezzel a törekvéssel. Ugyanebben az időben a kozmológusok viszont újra felfedezték a száműzött állandót, és megpróbálták saját céljaikra használni. Az 1960-as években felmerült egy

⁶³ Steven Weinberg: *A kozmológiai állandó problémája (The Cosmological Constant Problem)*, Morris Loeb Lectures in Physics, Harvard University. 1988. május.

halasztást nem tűrő, ugyanakkor gyors megoldást nem ígérő kozmológiai kérdés: a kvazárok problémája.

A kvazárok (más szóval: kvázi csillagszerű objektumok) rengeteg rádióenergiát bocsátanak ki, amelyet a csillagászok észlelnek. Megmagyarázhatatlanul sok olyan kvazárt találtak, amelynek a vöröseltolódási értéke kb. $z = 1,95$. Ezek tőlünk térben és időben is igen távol helyezkednek el, és körülbelül ugyanakkor keletkezhettek (ezt vöröseltolódásuk alapján tudjuk, amely jelzi a tőlünk való távolodásuk sebességét). De miért? A kozmológusok tudták, hogy a jelenség könnyen megmagyarázható lenne, ha a világegyetem valamilyen okból nem tágult volna túl sokat a kvazárok keletkezésének idejében, hiszen akkor körülbelül ugyanolyan távolságra helyezkedtek volna el tőlünk. A világegyetem tágulását lelassítani vagy megállítani viszont mi tudná jobban, mint a kozmológiai állandó? Több kozmológus is éveket töltött el ennek a rejtélynek a tisztázásával.⁶⁴

A részecskefizikusok nem adták fel. Most az elektroyengelelmélet (más néven a standard modell) alapján próbálták megválaszolni a spontán szimmetriasértéssel kapcsolatban felmerülő kérdéseket. Szimmetriasértésnek nevezzük azt a folyamatot, amikor a különböző típusú részecskék keletkeztek a világegyetem kezdeti szakaszában. A részecskefizikusok szerint mivel egy elektron különbözik egy kvarktól, keletkezésükkor egy szimmetria tört meg. A tudósok egy olyan problémával szembesültek, amelyben a sűrűség értéke valahogyan negatív lett. Ekkor úgy tűnt, hogy ha a Λ kozmológiai állandót egyenleteikbe illesztik, akkor kiesik egy fontos tényező, és ez meghozza az eredményt. Ennek viszont az lett volna a mellékhatása, hogy a távoli múltban a Λ értéke valószínűleg nagyon nagy volt. Ezzel nem tudtak mit kezdeni, amíg Guth ki nem találta a felfűvódó világegyetem-modellt. Ha

⁶⁴ A kvazárjelenségnek más magyarázata is lehetséges. Ezt a megjegyzést Alan Guth tette – köszönöm neki.

a kozmológiai állandó valóban olyan nagy volt az ősrobbanás utáni első pillanatban, akkor ez lehetett az az erő, amely a világegyetem exponenciális tágulását okozta. Így ha a kozmológiai állandót bele vesszük az egyenletbe, értékét nagyon gondosan kell megválasztanunk.

A tudományban mindig kellenek friss, új elméletek, amelyekhez új matematikai eszközökre van szükség. Einstein egyenletét nem elég próbálgatásos módszerrel megközelíteni. A nevezetes egyenlet nagyon is jól teljesített az eltelt évek során, sok új fizikai felfedezést köszönhetünk az egyenletből következő előrejelzéseknek. De ha valaki a kozmológiai állandót is tartalmazó egyenletből próbál kiindulni, vagy a relativisztikus egyenletet kvantumelmélettel próbálja párosítani, akkor kevés sikerrel jár. Az emberiség egyszerűen még nem érti eléggé a bűvös egyenletet.

1985-ben egy új elmélet született, amely ígéretesnek tűnt többféle fizikai probléma megoldásának szempontjából is: a szuperhúrelmélet. Az elmélet a téridő négy dimenziója helyett tizeneggyel dolgozik abban az értelemben, hogy a világegyetemet modellező szuperhúrelmélet egyenletei tizenegy dimenziót használnak. Az elméletnek érdekes eredményei vannak, de még nem oldotta meg Einstein kozmológiai állandójának problémáját. Az 1980-as évek végén a matematikusok kidolgoztak egy másik szuperhúrelméletet, amelyben két térváltozót tömörítettek. De amikor megpróbálták az eredményt a négydimenziós téridőre kiterjeszteni, a módszer csődöt mondott, és az építmény összedőlt.

1996 decemberében a londoni lapok arról számoltak be, hogy Stephen Hawking, a híres kozmológus egy „matematikai gyorstalpalóra iratkozott be”.⁶⁵ Egy oxfordi matematikaprofesszor előadássorozatot tervezett a négydimenziós felületek topológiájáról, és kapcsolatukról az

⁶⁵ H. Aldersley-Williams, "Az erő legyen velünk?" ("May the Force be with Us?"), *The Independent*, 1996. december., 20. oldal.

általános relativitáselmélettel és a kvantumelmélettel. A téma több kozmológus érdeklődését is felkeltette, köztük Hawkingét. Úgy tűnt, hogy a matematikus egy érdekes kapcsolatot fedezett fel a négydimenziós felületek és az „egzotikus”, csak a négydimenziós terekre jellemző fizikai jelenségek között. Sir Roger Penrose, a nagy hírű topológus, aki szakterületének már több elvont matematikai felfedezését alkalmazta a fizikai problémák megoldására, így nyilatkozott erről az eredményről: „Az alapvető részecskék viselkedéséről szerzett ismereteket alkalmazva teljesen váratlanul tiszta matematikai eredményt ért el. Ez csak akkor igaz, ha a dimenziók száma négy.” A matematikus elméleti matematikai munkája rávilágított, hogy a kozmológusoknak és fizikusoknak miért volt annyi bajuk a kozmológiai állandóval és más problémákkal: a négydimenziós geometria viselkedése „deviáns” – és ez csak a négyre igaz. Mi viszont arra vagyunk kárhoztatva, hogy négydimenziós világegyetemben éljünk, legalábbis a fizika szempontjából.

A kozmológusokat nem rettentették el az új felfedezések, sőt új lehetőségeket láttak bennük, és azonnal munkához láttak. Megpróbálták a négydimenziós terekkel kapcsolatos új eredményeket összefésülni saját relativitás- és kvantumelméleti elgondolásaikkal. A cél túlmutatott a kozmológiai állandó nyakon csípésénél, ennél magasztosabb volt, egy valóságos fizikusálom: az egyesített térelmélet megalkotása, amely leírja az összes természeti erőt. A kozmológusok Einsteint követve jutottak el idáig, aki, miután 1932-ben kivándorolt az Egyesült Államokba, és csatlakozott a Felsőfokú Tudományok Intézetéhez (Institute of Advanced Studies), életének utolsó éveit a fizika különböző területeinek egyesítésével töltötte.

Albert Einstein tudásszomja olthatatlan volt. Hívó emberként a tudományt úgy tekintette, mint az isteni teremtes megismerési folyamatát. A mai tudósok nagy része is így van ezzel. Ők vezetik a kutatásokat, és próbálják megérteni a teremtetett világ

rejtélyeit. Mélyfilozófiai kérdéseket tesznek fel a világegyetem származásával, jövőjével és természetével kapcsolatban.

1997-ben Stephen Hawking azt nyilatkozta, hogy húsz éven belül kezünkben lesznek a világegyetem alapvető törvényei. Más kozmológusok ezt azonnal cáfolták, mondván, hogy húsz éve is ezt mondta volna. De Hawking úgy viselkedett, mint aki még tartogat egy-két ütőkártyát. Einstein szellemében így folytatta: „Közelítünk Istenhez.”⁶⁶ 1998 márciusában Hawking előhúzott egy adut. Az „instanton” fogalmával próbálta az ősrobbanást megmagyarázni. Hawking és munkatársai szerint ez a fogalom közelebb vitte a tudományt a „minden elméletéhez”. Egy hónappal később az éppen Kaliforniában tartózkodó Hawking és kollégája, a londoni Neil Turok nagy hírverés közepette bejelentették az új elmélet világra jöttét. De Hawking nem Einstein, forduljon bár Istenhez, ahogyan ő tette volna. Hawking és csapata mind a mai napig nem álltak elő semmivel, ami csak megközelítette volna Einstein elméletét.

Mit is értek el eddig? Hawking és Turok Alan Guth felfűvódó modelljéből indult ki. Sejtve azt, amit az 1998-as felfedezések megerősítettek, tehát hogy a világegyetem „nyílt”, és ezért be fogja tölteni a végtelen űrt korlátlan tágulása során, a következő kérdést tették fel: A felfűvódási elmélet világegyetemének mindenképpen laposnak kell lennie? Az elmélet hívei ugyanis általában ezt vallják, de nem lehet-e mégis nyílt? Hawking és munkatársa, James Hartle néhány éve már próbálkoztak ezzel a megközelítéssel, de a felfűvódó modellt akkor egy zárt világegyetemre próbálták alkalmazni Richard Feynman legendás amerikai fizikus útintegrál-elvét alkalmazva.

Turok, aki nem hitt a lapos és a zárt világegyetekben, 1995-ben egy előadást tartott Cambridge-ben a nyílt világegyetemmel kapcsolatos kutatási eredményekről. Steven Hawking felfigyelt rá, és ettől fogva együtt dolgoztak. Sokáig

⁶⁶ *The Observer*, 1997. november 23.

próbálkoztak a nyílt világegyetem olyan megközelítésével, ahogyan azt Hartle és Hawking a zárt világegyetemmel tette, de próbálkozásaik kudarcba fulladtak. A problémát a végtelen jelentette. Ha az egyenletben feltűnik egy végtelen összetevő, akkor a Feynman-féle útintegrál-elv nem alkalmazható. Egy szép napon Turok éppen egy matematikai kifejezést írt Hawking táblájára. Hirtelen Hawking megszólította számítógépén keresztül (Hawking egyetlen ujjá kivételével teljesen mozgásképtelen, de ez elég neki az egér mozgatásához, és a számítógép hangját használja beszéd helyett). Turok ugyanis véletlenül kihagyott egy fontos tényezőt az egyenletből. Tovább dolgoztak a javított egyenleten, és a végtelen összetevő kiesett. Hirtelen egy olyan tér bontakozott ki előttük, amely felfűvódással írta le a világegyetem fejlődését az ősrobbanástól egy nyílt világegyetemig – és a kezdetén nem volt szingularitás.

A szingularitás helyett Turok és Hawking bevezették az instanton fogalmát. Ez egy roppantul tömör téridőrészecke, tömege borsónyi, de mérete a borsóénak csak a milliomod trilliomodának a trilliomoda. Azért választották ezt az elnevezést, mert létezése csupán egyetlen pillanatra (= instant) korlátozódik. Az instanton előtt nem volt tér vagy idő. Az ősrobbanás szingularitásától eltérően az instanton sima. Robbanásakor megkezdődik az Alan Guth által feltételezett kozmikus felfűvódás. Az instantonból keletkezett világegyetem pedig végtelenül terjed tovább. Lehet, hogy az elkövetkező évek világűr-megfigyelési eredményei alapján eldől majd, hogy melyik elmélet a helyes, hogy hogyan kezdődött a világegyetem, hogy vajon egységesíthetőek-e a természeti erők, és hogy a kozmológiai állandó vajon része-e az egész fizikát átfogó egyenletnek.



Saul Perlmutter

Lawrence Berkeley Nemzeti Laboratórium

A legtöbb tudós egyetért abban, hogy a világegyetem valószínűleg egy hatalmas tágulás során keletkezett egy nagyon forró, sűrű állapotból, valamiféle ősrobbanással. Ez a hihetetlen erejű kezdeti tágulás indította el az anyag, az energia, majd később a galaxisok: csillagok és bolygók kialakulását, valamint ekkor jött létre a titokzatos, láthatatlan sötét anyag. De arról, hogy hogyan folytatódott a történet az ősrobbanás után, a legkülönbözőbb nézetek, sőt filozófiai irányzatok születtek. Saul Perlmutter, aki a világ legerősebb távcsövének segítségével eddig a legközelebb jutott ahhoz, hogy gyakorlatban is megfigyelje a világegyetem tágulását, óvatos. Eredményei alapján neki is megvan a saját elmélete.

Saul Perlmutter 1959-ben született az illinoisi Urbana-Champaignban. Mindkét szülője akadémikus, fiuk születésekor az állami egyetemen dolgoztak. Saul még kisfiú volt, amikor Philadephiába költöztek, ahol kvéker iskolába járt. A

matematikával és a természettudományokkal nem volt sok gondja, ezért idejét inkább a humán tanulmányokra fordította, hiszen ez jelentett nagyobb kihívást. Hegedült is. A Harvardon tanult tovább; 1981-ben filozófiai és fizikai diplomát szerzett, majd a berkeleyi Kaliforniai Egyetemen folytatta tanulmányait a fizikai doktori cím elérése érdekében. Itt az évek folyamán több nagy teljesítményű kutatócsoport munkáját is megismerte. 1982-ben egy törtnagyságú részecskéket kutató csoporttal dolgozott, de hamarosan inkább azokhoz a végzett hallgatókhoz csatlakozott, akiket Richard Muller professzor vezetett. Muller maga Louis Alvareznek, a néhai szabadgondolkodó fizikusnak a tanítványa volt, aki Walter nevű fiával megtalálta annak bizonyítékát, hogy a 65 millió éve élt dinoszauruszok kihalását egy nagy aszteroidabecsapódás okozta.

Muller és tanítványai továbbvitték elképzelésüket: a halványvörös csillagok csillagászati megfigyeléseit használták egy Nemezis nevű csillag megtalálására. A Nemezis a Nap feltételezett társcsillaga, amely 52 millió évenként kerüli meg azt. Amikor legközelebb van hozzá, tehát 26 millió évenként, tömeges kipusztulások történnek, mivel a Nemezis gravitációs vonzereje aszteroidákat húz magával, és lódít felénk. Ha valaki megtalálná a Nemezist, az nemcsak a dinoszauruszok kihalásának módját adná meg, hanem ennek, és más hasonló katasztrófáknak az okát is. A csoport a parallaxis módszerével megmérte kb. 300 csillag távolságát. Ezeket 2000 „gyanúsított” közül választották ki egy csillagkatalógusból, de mindegyik túlságosan távolinak bizonyult. A keresést különböző okok miatt felfüggesztették. Saul egy hónapra eltűnt; mint utóbb kiderült, ezt az időt a Berkeley egyik fizikaépületének pincéjében töltötte. Amikor kijött, kezében egy új találmányt tartott: egy robottávcsövet.

Saul az új eszközhöz új célokat keresett. Számítógépes vezérlésű távcsövével egy egészen új eljárással keresett szupernóvákat: a távoli galaxisokat módszeresen

végigpásztázta. 1985-re húsz ilyen ritka fajtájú robbanást talált a távolban.

1986-ban megkapta a fizikai tudományok doktora címet, majd a következő évben Carl Pennypacker kollégájával együtt rájöttek, hogy a robottávcsöves technika nem csak a szupernóvák felkutatására alkalmas, de segítségével meg lehetne mérni a világegyetem *lassulásának* mértékét. Tudnunk kell, hogy még 1987-ben is az volt az uralkodó fizikai nézet, hogy az ősrobbanással kezdődött világegyetemnek lassulnia kell a benne lévő anyagok kölcsönös tömegvonzása miatt. A csoport elkezdte méréseit egy ausztráliai négy méteres távcső segítségével, $z = 0,3$ -nál szupernóva-robbanásokat találtak, de nem haladtak elég gyorsan. Az időjárás gyakran megakadályozta a megfigyelést, és más nehézségek is adódtak. A csapat egyre népesebb lett, ezért megfigyelési központját áttette a Kanári-szigetek La Palma nevű tagjára, ahol egy 2,5 méteres távcsövet használhattak. A tudósok eddigre elérték a $z = 0,45$ -ös értéket, és nagyobb adagokban dolgozták fel az adatokat, vagyis nagyobb galaxismegfigyelési halmazokból választottak ki egyre több szupernóvát. Eredményeiket egyenesen a Berkeleyre küldték az interneten keresztül.

Ekkor Saul már a Berkeley Nemzeti Laboratórium alkalmazásában állt; ez az épület az egyetem dombjai fölött helyezkedik el. A laboratórium lett a megfigyelések központja. Mivel a csapat jó eredményeket ért el, egyre jobb távcsöveket használhattak. Végül már a Föld legjobb távcsövét használták, a hawaii 9,8 méteres Keck-ikertávcsöveket és a Hubble-űrtávcsövet. A távoli robbanásészlelések meglepetésszerűen rendszerességgel történtek. De az összes megfigyelés egy olyan képet rajzolt ki, amely éppen ellenkezett azzal, amit a tudomány akkori állása szerint vártak. A világegyetem tágulása nem lassul, hanem gyorsul. A különböző vöröseltolódási szinteken folytatott megfigyelések alapján úgy látszott, hogy az ősrobbanás utáni időszaktól körülbelül hétmilliárd évvel

ezelőttig a világegyetem valóban egyre lassabban tágult. De a világegyetem anyagának sűrűsége egyszerűen nem volt elegendő a tágulás leállításához. A világegyetem növekedett, anyaga ritkult, és felülkerekedett Einstein „fura energiája”. Hétmilliárd évvel ezelőtt ismét felgyorsult a tágulás, és a világegyetem most is egyre gyorsabban növekszik.

Perlmutter kísérleti tudós, ezért mindig kész adatai átértelmezésére. Alapelve, hogy minden felmerülő feltételezés minden lehetséges ágát végig kell járni. 1999 tavaszára azonban már annyi, egy irányba mutató mérési eredménnyel rendelkeztek, hogy nem volt kétséges: a világegyetem egyre gyorsabban tágul. Perlmutter a megfigyelések alapján most úgy gondolja, a világegyetem lapos, vagyis euklideszi geometriájú, és tágulása korlátlan. A kutatás végén a csillagászok már az eredetileg tervezettnél sokkal távolabbi galaxisokból gyűjtötték adataikat. Olyan távoli galaxisokból ($z = 1,2$), amelyekből a fény akkor indult el a Földre, amikor a világegyetem tágulása még lassult. Ez ellentétes az adatok nagy többségével, hiszen a $z = 0,7$ távolságra lévő galaxisok a jelenlegi, gyorsulva táguló világegyetemről tanúskodnak. Azért is mentek távolabbra, hogy kipróbálják, elméletük milyen határok között igaz. Eddig minden adat alátámasztotta feltételezésüket.

A csoport eredményei alapján Perlmutter azt is állítja, hogy a kozmológiai állandónak fontos szerepe van, és éppen hogy nem Einstein legnagyobb baklövése, hanem igenis elengedhetetlen része a világegyetemet, annak múltját és jövőjét meghatározó egyenletnek. Perlmutter, a legtöbb mai csillagászhoz hasonlóan, hisz a felfűvódó világegyetem elméletében. Ezek szerint – és a legújabb csillagászati kutatások alapján levont, széles körben elfogadott következtetések is ezt támasztják alá – világegyetemünk egy hatalmas tágulással kezdődött, ami évmilliókon keresztül lassult, majd újra gyorsulni kezdett – és ma itt tartunk. Ha a következtetések valóban helyesek, a világegyetem tágulása soha nem ér véget.

– Nem tudhatjuk pontosan, mi is történhetett akkor – az ősrobbanás egyedülálló jelenség. Nem hiszek a titokzatos, soha nem látott mezőkben és gyermek- vagy szülő-világegyetemekben. Semmi nem támasztja alá ezeket a feltételezéseket – mondta nekem Sir Roger Penrose. Ő 1965-ben állt elő saját elméletével, amelyben hatékony topológiai módszerekkel bizonyította a téridő ősrobbanáskori szingularitását. – Azt hiszem, a világegyetem geometriája hiperbolikus, de ehhez nem kell kozmológiai állandó, nem hiszek benne. Kétségeim vannak a felfűvódó világegyetem elméletével kapcsolatban is. Nem szeretem, amikor valaki kitalál egy elméletet, és ha a kísérleti adatok nem támogatják, egyszerűen megváltoztatja, újra és újra.

Alan Guth véleménye más: – Még nem tudjuk pontosan, hogy a felfűvódás hogyan történt, de majdnem biztos vagyok, hogy a világegyetem csak így kezdődhetett. Ez az egyetlen meggyőző magyarázat arra, hogyan lett a világegyetem ilyen nagy, egyenletes és lapos. A tudósok kétségtelenül addig fognak vitázni, amíg meg nem fejtik a világegyetem rejtélyét. Egy dologban azonban megegyeznek, és ez nem más, mint Einstein általános relativitáselméletének abszolút ereje és hasznossága. Ha valóban „Isten gondolataira” vagyunk kíváncsiak, valószínűleg kvantumelméleti megfontolásokkal kell kibővítenünk a relativitáselméletet. Akármilyen legyen is a végső egyenlet, Einstein egyenlete biztosan fontos része lesz. Einstein életének álma teljesült fantasztikus egyenletének leírásával – valamennyit biztosan hallott Isten gondolataiból. Álljon itt tehát még egyszer Einstein kozmológiai állandót tartalmazó téregyenlete, amely a mai napig leginkább közelíti Isten egyenletét:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} R - \lambda g_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}.$$

ahol $R_{\mu\nu}$ a Ricci-tenzor, R ennek a nyoma, λ a kozmológiai állandó, $g_{\mu\nu}$ a téргеometria metrikus tenzora, G a newtoni gravitációs állandó, $T_{\mu\nu}$ az energia, impulzus és anyag tulajdonságait leíró tenzor, $\frac{1}{2}$, 8 és π pedig számok.

Einstein *A későbbi éveim (Out of My Later Years*, New York: Philosophical Library 1950, 48. oldal) című könyvében utal arra, hogy hogyan látja a jövőt, és hogy miért nem tudta megalkotni a „minden” egyesített elméletét:

Az általános relativitáselmélet még nem teljes, hiszen a relativitás általános elvét kielégítően csak gravitációs terekre tudja alkalmazni, az egész térre nem. Még nem tudjuk bizonyosan, hogy milyen matematikai eszközzel írható le az egész tér, és milyen nagyobb, változatlan törvényeknek engedelmeskedik. Egy dolog azonban biztosnak tűnik: az általános relativitáselmélet biztosan szükséges és hatékony eszköze lesz az egész tér problémája megoldásának.

Einstein tudta, hogy törekvéseit a matematikai eszközök hiánya akadályozza. A speciális relativitáselmélet kidolgozásakor Lorentz és Minkowski matematikáját használta, az általános relativitáselmülethez pedig először Ricci és Levi-Civita, később pedig Riemann matematikáját. De itt meg kellett állnia. Közel járt Isten egyenletének kiderítéséhez, de a továbblépéshez új matematikai eszközök kellettek volna. Olyanok például, amilyenekre S. S. Chern utalt princetoni beszédében: magasabb szintű geometriai és topológiai absztrakciók. A matematikusok előbb-utóbb majd kidolgozzák ezeket, a fizikusok alkalmazzák őket, a csillagászok megerősítik, és adataikkal alátámasztják azokat, a kozmológusok pedig megrajzolják világegyetemünk képét.

Amikor majd minden egyes tudományág támogatja a többi fejlődését, megérthetjük talán a természeti törvényeket, és leírhatunk talán egy egyenletet, amely majd megközelíti – amennyire ez az embertől lehetséges – Isten egyenletét. Az egyenlettel a kezünkben meg tudjuk majd oldani a teremtés csodálatos rejtélyét. Lehet, hogy Isten éppen ezért küldött ide minket?

Irodalomjegyzék

a) Tankönyvek

1. Novobátsky Károly: *A relativitás elmélete*. Tankönyvkiadó, Bp., 1951.
2. Nagy Károly: *Elektrodinamika* (a relativitáselmélet rövid ismertetésével). Tankönyvkiadó, Bp., 1989.
3. Hráskó Péter: *Relativitáselmélet*. Typotex, Bp., 2002.
4. L. D. Landau – E. M. Lifsic: *Klasszikus erőterek (Elméleti fizika II)*. Tankönyvkiadó, Bp., 1976.
5. Lánosz Kornél: *A geometriai térfogalom fejlődése*. Gondolat, Bp., 1976.
6. Holics László (szerkesztő): *Fizika (II. kötet) Relativitáselmélet*. (Abonyi Iván). Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1992.
7. Alvin Hudson – Rex Nelson: *Útban a modern fizikához* (XLI. fejezet, A speciális relativitáselmélet). LSI Oktatóközpont, Bp., 1994.

b) Eredeti tanulmányok

1. A. Einstein: *Válogatott tanulmányok*. Gondolat, Bp., 1971.
2. S. Hawking – R. Penrose: *A tér és az idő természete*. Talentum, Bp., 1999.
3. S. Weinberg: *Az első három perc*. Gondolat, Bp., 1982.
4. E. E Taylor – J. A. Wheeler: *Téridő-fizika*. Gondolat, Bp., 1974.
5. Ja. B. Zeldovics – Sz. J. Blinnikov – Ny. J. Sakura: *A csillagszerkezet és csillagfejlődés fizikai alapjai* (VIII.-X. fejezet). Gondolat, Bp., 1988.

c) Általános és filozófiai vonatkozások

1. S. Hawking: *Az idő rövid története*. Maecenas-Talentum, Bp., 1999, 2001.
2. S. Hawking: *A világegyetem dióhéjban* (Az idő rövid történetének folytatása). Akkord Kiadó, Bp., 2002.
3. S. Hawking: *Einstein álma és egyéb írások*. Vince Kiadó, Bp., 1999, 2000, 2001.
4. W. Kaufmann III.: *Relativitás és kozmológia*. Gondolat, Bp., 1985.
5. L. Mlodinow: *Eukleidész ablaka*. Akkord Kiadó, Bp., 2003.
6. R. Penrose: *A császár új elméje*. Akadémiai Kiadó, Bp., 1993.
7. G. J. Gorelik: *Miért háromdimenziós a tér?* Gondolat, Bp., 1987.
8. Székely László: *Einstein kozmoszától a felfűvódó világegyetemig*. ELTE Bölcsészettudományi Kara, Bp., 1990.

Mutató

(Oldalszámok az eredeti könyv szerint!)

Ia típusú szupernóva 20

II-es típusú szupernóva 21

Abraham, Max 117

abszolút magnitúdó 164

Adelhard of Bath 61

Albrecht, Andy 41, 199

Alpher, Ralph 177

általános relativitáselmélet 11, 115,
148, 153, 183, 219

Alvarez Louis és Walter 216

Androméda-csillagköd 165

anyag összetétele 183

anyag természete 183, 188

asztrális geometria 70

Bahcall, John 201, 202

Bahcall, Neta A. 13, 28, 199, 201-204

barionanyag 173

Beltarmi, Eugenio 108

Besso, Michele Angelo 35, 41, 44,
82, 91

Bianchi, Luigi 116, 119

Big Bang 12, 170

Lásd még nagy recs, téridő

szingularitás, világegyetem

tágulása, felfúvódó világegyetem
elmélete

Bolyai Farkas 68

Bolyai János 68

centrifugális erő 71

Chandrasekhar, S. 127, 128, 149

Chern S. S. 107, 212, 220

Clark, Ronald W. 73, 81, 90, 91

COBE műhold 178

Corry L. 119, 120

Cottingham 139, 141

Cowan, Clyde 184

Crommelin, A. C. D. 132

csillag tömegvonzása 54

csillagköd 20, 157

csillagok magnitúdója 138

Daly, Ruth 28, 201

Delta-Cephei típusú csillag 164

Demetz, Peter 46

Dicke, Robert H. 177

differenciálegyenlet 155

differenciálgeometria 104, 107

Doppler-hatás 22, 163, 178

Dyson, Frank 129, 146

Eddington, Arthur 98-99, 127-142,
144-145, 147-151

Eddington-Dyson-elmélet 148

egyenletes tágulás 180

egyesített térelmélet 212

egyidejűség 42

egyöntetű térelmélet 162

Ehrenfest, Paul 79, 144, 145, 160, 161
 Einstein, Albert 8-16, 24, 29-56, 66, 71-79, 81-92, 95-98, 103-107, 111-129, 137, 141-162, 166, 167, 169, 170, 181, 183, 189, 191-193, 196, 200, 203, 204, 206, 207, 209, 211, 213, 217-219
 Einstein, Elsa 89
 Einstein gravitációs téregyenlete 31
 Einstein, Mileva (Maric) 34, 36, 89
 Einstein téregyenlete 192
 ekvivalenciaelv 47
 elektromágneses elmélet 210
 elektromágneses jelenség 38
 energia-impulzus megmaradási tétele 119
 erőter 38, 199
 Escher, Maurits Cornelis 65, 66, 67
 éter 38, 40, 148
 ETH (Zürichi műszaki főiskola) 15, 34, 35, 53, 55
 euklideszi geometria 33, 56, 59, 63, 191
 probléma 57-72
 tér görbülete 101
 fehér lyuk 172
 fehér törpe 21, 22
 fekete lyuk 21, 27, 124, 170-172
 feketetest-sugárzás 177
 felfúvódó (inflációs) világegyetem elmélete 173
 fényelgörbülés 51, 52, 84, 86, 96, 115, 123, 129, 140, 141, 145, 147, 148, 150, 161, 203
 fény-gravitáció kölcsönhatás 137
 fénysebesség 13, 22, 23, 39, 41, 43, 157
 Fermi, Enrico 184

Fermilab (Fermi Nemzeti Részecskegyorsító Laboratórium) 200, 205
 Feynman Richard 213
 Feynman-féle útintegrál 214
 Fokker, A. 114
 fotonsugárzás 173
 Foucault-inga 154
 Fölsing, Albrecht 41
 fraktál 186, 187
 Frank, Philipp 49, 54, 55, 111, 113, 114
 Freundlich, Erwin 8, 14, 15, 51, 52, 79, 81, 82, 84-93, 95-98, 113, 116, 129, 150, 151
 Friedmann, Alexander 167, 170
 Frieman, Joshua 200
 fura energia 195, 205
 galaxis távolodási sebessége 25
 galaxisok 19, 22-24, 26, 157, 163-166, 173, 177-180, 186-188, 197, 201, 203, 214, 218
 Galilei, Galileo 37, 39
 Gamow, George 177
 Gauss, Carl Friedrich 62, 66, 68, 70, 100-102, 106, 109, 191
 Geller, Margaret 187
 geodetikus görbe 159
 geometriai térmetrika 147
 gömbfelület görbülete 101
 gömbi geometria 102, 103
 görbület 49, 101, 103, 119, 122, 159, 160, 171, 191, 193
 görbült tér egyenesei 123
 gravitáció 16, 43, 44, 47-49, 51, 54-56, 76, 79, 114, 115, 117, 123, 124, 128, 140, 147, 155, 172, 188, 189, 197, 200, 207
 gravitációs erőter 47
 gravitációs hullám 123, 124
 gravitációs lencse 52, 53, 81

- gravitációs mező 155
gravitációs potenciál 157
gravitációs téregyenlet 31
 lineáris alakja 122
gravitációs vöröseltolódás 47
Grossmann, Marcel 34, 36, 73-80, 85,
 114, 115
Guerra, Erick 28
Guth, Alan 11-13, 162, 169, 173, 176,
 177, 199, 210, 213, 214, 218
Guth kozmológiája 176

gyermek-világegyetem 177

Haber, Fritz 82
halott csillagok 27
Hartle, James 213
Hawking, Stephen 211-214
Herman, Robert 177
Hertz, Gustav 113
Hertz, Heinrich 38
Higgs-mező 177
Hilbert, David 118, 119, 120
hiperbolikus geometria 108
Hooker-távcső 165
horizontprobléma 174, 175, 176
Hoyle, Fred 170
Hu, Ester M. 13, 175, 180
Hubble, Edwin 23, 26, 163-166, 178,
 179, 193, 204, 217
Hubble
 -állandó 166
 -törvény 166
 -űrtávcső 164, 203
Huchra, John 187
Humason, Milton 165

indirekt bizonyítás 62
inflációs világegyetem elmélete 173
instanton 213, 214
invarianciaelv 77
 unimoduláris 116

Irvine-Michigan-Brookhaven kísérlet
 185
„Isten egyenlete” 209-220

Johnson, George 9, 212

Keck-ikertávcső 175
keretvonszolás 123
kettős csillagok 86, 88
 pulzár 202
Kirshner, Robert 205
Klein, Felix 82, 105-107
Klein-palack 105, 106
kovariancia 119, 120
kovariáns egyenlet 120
 kozmikus háttérsugárzás 176, 178
 tágulás 164, 179
 kozmológiai állandó 29, 31, 159, 160,
 162, 167, 169, 189, 192, 194, 206,
 209, 210, 212, 214, 218, 219
krimi expedíció 81-98
kritikus sűrűség világegyetemé 174,
 193
Krupp, Gustav 90
kvantumelmélet 78, 125, 183, 186
 -hullámzás, 187
 -kozmológia, 200
kvazárok 210
kvintesszencia 207

lapos világegyetem 193, 195, 197
laposságprobléma 174
Lapparent, Valerie de 187
látszólagos magnitúdó 164
Laue, Max von 113
Leavitt, Henrietta 163, 164
Lemaître, Georges 167, 170
Levi-Civita, Tullio 50, 75, 77, 116
Lobacsevszkij, Nyikolaj Ivanovics 70
Lodge, Oliver 148
Lorentz, H. A. 38, 144, 145, 160, 219
Lorentz-transzformáció 48

Mach, Ernst 37, 153, 154, 161, 162
Mach-elv 153
Magellán felhők 27, 163-165
magnétizáció 184
mágneses erőtér 38
Mandelbrot, Benoit 186
Mandl, Rudi W. 53
Maric, Mileva *lásd* Einstein, Mileva
Maxwell, James Clerk 37, 38, 40
Mayr, L. 151
Merkúr bolygó perihéliuma 115
Merkúr Napközeli pályaelterése, 92
metrika 103, 104
metrikus tenzor 77, 104, 119
mező 38, 58, 71, 75, 117, 155, 156
M1 Rák-köd 20
Michele Angelo Besso 35
Michelson, Albert A. 40, 41
Michelson-Morley kísérlet 39, 41
Mie, Gustav 85, 117
Minkowski, Herman 35, 48, 73, 74, 220
Minkowski-metrika 48
Minkowski-tér-idő 48, 74
monopólus 176
Morley, Edward W. 41
mozgó testek törvényei 44
mozgó vonatkoztatási rendszerek 39
Möbius, A. F. 106
Möbius-szalag 105, 106
Muller, Richard 215
műon-neutrínó 185

nagy recs 189, 194
napfogyatkozás 82, 85-88, 90, 92, 93, 96, 129, 130, 131, 133, 134, 136, 137, 143, 151
Napot súroló fénysugarak görbülése 96
Nasziraddin Al-Tuszi 60, 63
negatív nyomás 27, 205, 207

négydimenziós geometria 108, 212
nemeuklideszi geometria 64, 66, 75, 107
tér 107
Nernst, Walter Hermann 78, 113
neutrínó 184
-csillagászat 186
tömege 186
-oszcilláció 185
neutroncsillag 20, 21, 27
Newton, Isaac 37, 38, 43, 44, 50, 51, 55, 130, 137, 147, 148, 150, 154, 155
gravitációs állandója 122
newtoni gravitáció 43
Newton-Poisson összefüggés 156
Nordström, Gunnar 85, 117
normálgyertya 164
nova 21
Nöther, Emmy 118, 119

Ockham borotvája 37
ómega paraméter 196

ősleves 178
ősrobbanás 12, 170, 172, 173, 174, 177, 178, 200, 206
ősrobbanás-elmélet bizonyítéka 178
összevont Bianchi-azonosságok 119
ötödik posztulátum 59

Pauli, Wolfgang 183
Peebles, James E. 177
Pennypacker, Carl 216
Penrose, Roger 106, 171, 212, 218
Penzias, Arno 178
perihélium 115
probléma 117
Perlmutter, Saul 12, 19, 21, 23-28, 164, 196, 201, 204, 205, 214, 215, 217, 218
Pick, Georg 49, 50, 75

Pitagorasz-tétel 58, 103
 Planck, Max 15, 16, 43, 52, 78, 82,
 88, 97, 112, 113, 124, 125, 144,
 145
 Planck-korszak 200
 Playfair-axióma 59, 69
 Poincaré, Henri 38
 Poisson, Simeon-Denis 154
 Poisson-egyenlet, 155
 Pollak, Leo W. 51, 82
 Press, William 204
 Principe-szigeti expedíció 127-142
 Proclus 60
 pszeudogömb 108, 191
 pulzár 20, 202
 Püthagorasz 58

 rádiógalaxis 28
 Rák-köd 20
 Reines, Fred 184, 185
 relativitáselmélet 10-12, 31, 35, 38-
 45, 47, 50, 54-56, 71, 74, 76, 77,
 87, 88, 92, 97, 104, 106, 107, 113,
 114, 116, 117, 119, 121, 122, 124,
 127-130, 137, 140, 141, 143, 145,
 148, 153, 155, 156, 158, 160, 167,
 172, 183, 192, 219
 Renn, Jürgen 15, 52, 82, 119, 120,
 121
 Ricci, Gregorio 50, 75, 77, 116, 220
 Ricci-tenzor 119, 120, 122, 219
 Riemann, Georg Friedrich Bernhard
 63, 80, 99, 100-104, 106-110,
 115, 116, 121-123, 145, 155, 220
 Riemann-féle tér 105
 Riemann-metrika 9-110, 123
 robbanó csillagok 13, 19-30, 196
 robottávcső 216

 Saccheri, Girolamo 61-64, 66, 107
 Sauer, Tilman 121
 Schwarzschild, Karl 124, 170, 171

Schwarzschild-sugar 170, 171
 Shapley, Harlow 165
 sík egy pontos kompaktifikációja 156
 Silberstein, Ludwig 148, 149
 Sitter, Willem de 127, 128, 144, 145,
 160, 161, 162, 167
 Slipher, Vesto M. 163
 Soldner, Johann Georg von 51
 sötét anyag 188, 214
 speciális relativitáselmélet 38, 42, 43,
 45, 54, 71
 Stachel, John 15, 119-121
 standard modell 210
 statikus világegyetem 158
 Steinhardt, Paul 12, 28, 199, 200, 207
 Struve, Hermann 89

 szimmetriasértés 210
 szingularitási pont 170
 szuperhőrelmélet 211
 szupernóva 20, 21, 22, 23, 164, 186,
 201, 205, 216
 szuper-világegyetem 177

 táguló világegyetem 11, 12, 158, 167,
 204
 tau részecske 185
 távolságfüggvény 103
 Tejút 26, 157, 163, 165
 tenzor 76, 77, 79, 119, 120, 122, 123,
 159, 192, 207
 tér átlagos sűrűsége 160
 tér és az idő 39, 41, 170, 172, 183
 téregyenlet 31, 79, 111, 119, 123,
 151, 161, 193
 térgörbület 76, 116, 159
 téridő 11, 12, 16, 48, 103, 117, 120,
 122, 123, 171, 172, 196,
 211, 214, 218
 felgyűrődése 123
 görbülete 170
 szingularitás 171

-matematika, 48
Thomson, Joseph 146
topológia, 104, 105
torzított fény, 53
tömegösszeomlás, 171
tömegsűrűségi paraméter, 160
tömegvonzás, 24, 28, 154, 186, 187
Turner, Michael 205
Turok, Neil 213, 214

unimoduláris invariancia 116

űrbuborék 187
üres világűr 180

vákuumenergia 27
végtelen terű világegyetem 156
vektor 76, 77
világegyetem
 átlátszatlansága 173
 geometriája 107, 174, 191-198,
 218
 kezdőpontja 172
 kora 173
 kritikus sűrűsége 174, 193
 kulcsa 196
 összes anyagának átlagos
 sűrűsége 155
 sűrűsége 28, 174, 203

tágulása 23, 24, 25, 176, 179, 194,
200, 217, 218
tömegsűrűsége 188, 189, 192, 194
hiányzó tömege 186
világvonalelem 123
vonatkoztatási rendszer 47
Voss, Aurel 119
vöröseltolódás 23, 25, 48, 54, 55, 83,
85, 87, 148, 163, 165, 166

Wallis, John 63
Weinberg, Steven 169, 209
Weyl, Hermann 167
Wilson, Robert 178

Xiaohui Fan 28

Zeta Tauri 20
zéta függvény 100