Stephen Hawking

Az idő rövid története

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

1982-ben, a Harvard egyetemen tartott Loeb előadás-sorozatom alkalmából szántam rá magam, hogy megpróbáljak népszerű könyvet írni a térről és időről. Akkoriban már számos mű foglalkozott a világegyetem korai időszakával és a fekete lyukakkal. Akadt köztük nagyon jó, mint Steven Weinberg könyve, Az első három perc, és igen gyenge is; ezeket inkább nem nevezem meg. Én mégis úgy véltem, egyikük sem foglalkozik érdemben azokkal a kérdésekkel, amelyek engem kozmológiai és kvantumelméleti kutatásokra ösztönöztek: Miből keletkezett a világegyetem? Hogyan és miért kezdődött? Lesz-e vége, s ha igen, hogyan? Ezek a kérdések mindenkit érdekelnek. A modern tudomány tolvaj nyelve azonban csak a leírására használt matematikát alaposan ismerő maroknyi tudós számára érthető. A világegyetem eredetére és sorsára vonatkozó alapvető elképzelések viszont matematika nélkül is kifejthetők, és természettudományos ismeretek nélkül is megérthetők. Az volt a szándékom, hogy ilyen könyvet írjak. Az olvasónak kell eldöntenie, sikerrel jártam-e.

Egy jóakaróm figyelmeztetett: minden leírt egyenlet megfelezi az eladható példányszámot. Eltökéltem tehát, hogy egyet se használok. Végül mégis megkegyelmeztem Einstein híres egyenletének: $E=mc^2$. Bízom benne, hogy ezzel még nem rettentem vissza minden reménybeli olvasómat.

Betegségemtől - a mozgatóidegek sorvadása - eltekintve, szinte minden szempontból szerencsésnek mondhatom magam. Feleségem, Jane és három gyermekem, Robert, Lucy és Timmy segítsége és támogatása lehetővé tette, hogy alapvetően normális életet éljek és sikerrel haladhassak pályámon. Szakterületemet is szerencsésen választottam; az elméleti fizikához csak gondolkodásra van szükség. Rokkantságom ezért nem jelentett különösebb hátrányt. Kollégáim kivétel nélkül igen segítőkészek voltak.

Pályafutásom első, "klasszikus" korszakában Roger Penrose, Robert Geroch, Brandon Carter és George Ellis volt közvetlen kollégám és munkatársam. Hálás vagyok segítségükért és együttműködésükért. Ellisszel közösen írtuk meg 1973-ban A téridő nagyléptékű szerkezete című könyvünket, mely ezt a korszakot lezárta. Nem javasolnám olvasóimnak, hogy ott nézzenek utána a részleteknek : szövege az olvashatatlanságig szakszerű. Azóta remélhetőleg megtanultam, hogyan kell érthető könyvet írni. 1974 óta, munkám második, "kvantumos" korszakában Gary Gibbons, Don Page és Jim Hartle voltak legfőbb munkatársaim. Nagyon sokat köszönhetek nekik, és diákkutatóimnak is, akik a szónak mind fizikai, mind elméleti értelemben rengeteget segítettek. Kénytelen voltam lépést tartani velük, s ez nagyszerű serkentőnek bizonyult, amellett remélhetőleg elejét vette, hogy megragadjak a megszokott kerékvágásban.

E könyv megírásához hatalmas segítséget nyújtott egyik tanítványom, Brian Whitt. 1985-ben, az első változat megírása után tüdőgyulladást kaptam. Gégemetszésre került sor, s ezzel elvesztettem beszédképességemet; a kommunikáció csaknem teljesen lehetetlenné vált számomra. Attól tartottam, nem is fejezhetem be a könyvet. Brian azonban nem csupán közreműködött a kézirat átdolgozásában, hanem rábírt a Living Center elnevezésű kommunikációs program használatára is. A programot Walt Woltosz, a kaliforniai Sunnyvale-ben működő Words Plus Inc. munkatársa adományozta. Ennek segítségével könyveket és cikkeket is írhatok, sőt az ugyancsak Sunnyvale-ben székelő Speech Plus által adományozott beszédszintetizátor révén előadásokat is tarthatok. David Mason egy kisméretű személyi számítógéppel együtt a szintetizátort is tolószékemre rögzítette. Ez a rendszer teljesen megváltoztatta a helyzetet; ma már tulajdonképpen könnyebben érintkezem embertársaimmal, mint a hangom elvesztése előtt.

Számos jobbító javaslatot kaptam azoktól, akik olvasták könyvem első változatait. Ki kell emelnem

közülük Peter Guzzardit, szerkesztőmet a Bantam Books-nál, aki oldalszám küldözgette megjegyzéseit, valamint kérdéseit a szerinte homályban maradt részekről. Megvallom, elég ingerülten fogadtam hosszú listáit a módosítandókról, pedig teljesen igaza volt. Meggyőződésem, hogy kíméletlen hajcsárkodása hasznára vált a könyvnek.

Nagyon hálás vagyok asszisztenseimnek, Colin Williamsnek, David Thomasnak és Raymond Laftamme-nak; titkárnőirnnek, Judy Fellannak, Ann Ralphnak, Cheryl Billingtonnak és Sue Masey-nak, valamint ápolónőim csapatának. E munka egyetlen részlete sem készülhetett volna el kutatási és orvosi költségeim fedezése nélkül, melyeket a Gonville and Caius College, a Science and Engineering Research Council és a Leverhulme, McArthur, Nuffield és Ralph Smith Alapítvány fedezett. Nagyon hálás vagyok nekik.

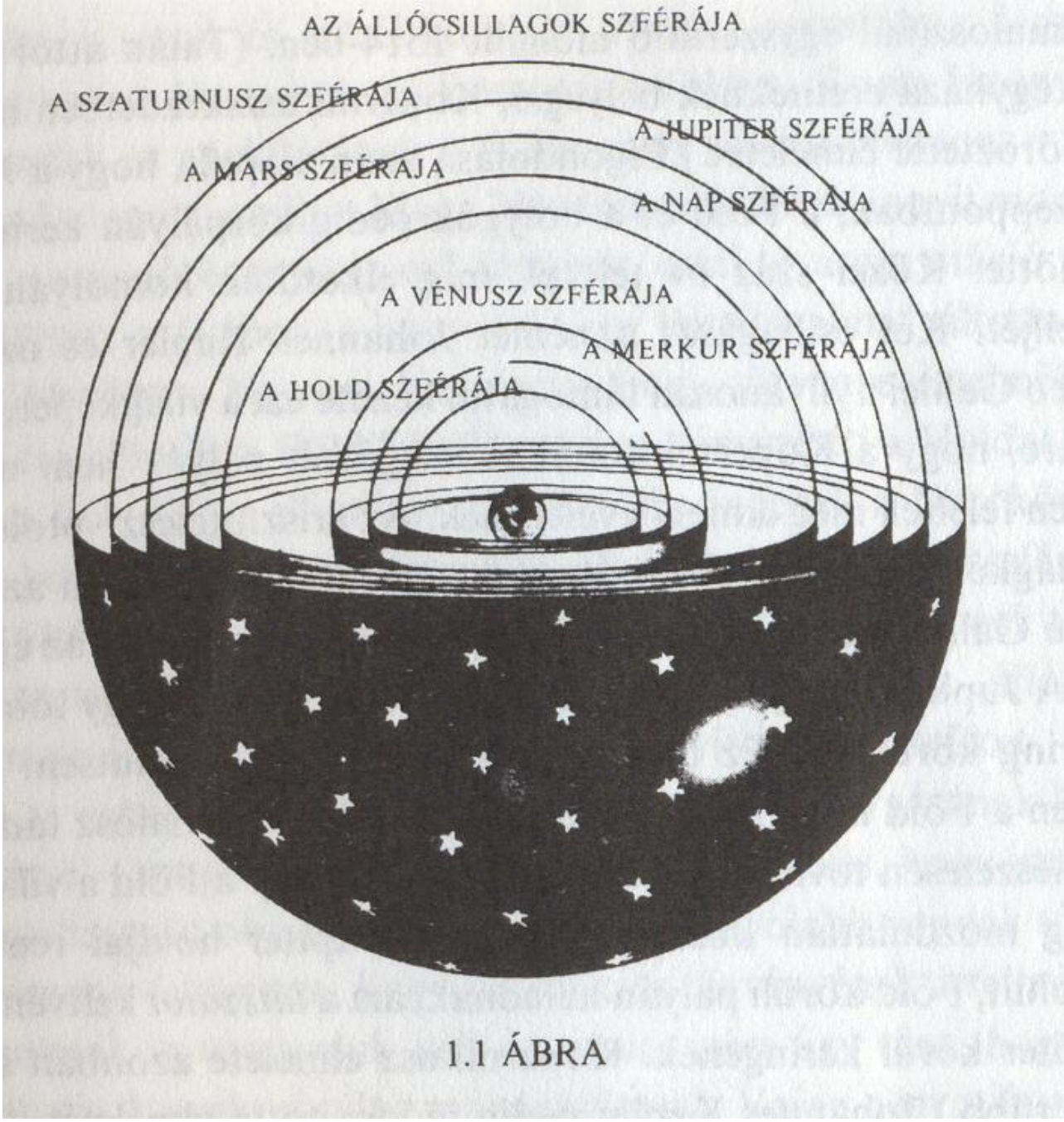
1987. október 20.
Stephen Hawking

MILYENNEK LÁTJUK A VILÁGEGYETEMET?

Egy híres tudós (többek szerint Bertrand Russell) ismeretterjesztő előadást tartott a csillagászatról. Érzékletesen elmondta, hogyan kering a Föld a Nap körül, a Nap pedig a galaxisunkat alkotó hatalmas csillaghalmaz középpontja körül. Az előadás végén a hátsó sorban felállt egy apró, idős hölgy, és így szólt: - Mit fecseg itt összevissza nekünk? A Föld a valóságban lapos, és egy óriási teknősbéka hátán nyugszik.
- No és mi tartja a teknősbékát? - mosolygott fölényesen a tudós.
- De okos maga, fiatalember, hű, de okos - válaszolt a néni. - Egyszerű: egy másik teknősbéka, azt megint egy másik, és így tovább.

Legtöbben mulatságosnak találják az elképzelést, hogy világegyetemünket egy végtelenbe nyúló teknősbékatorony alkotja, holott mi a biztosítékunk, hogy nem így van? Mit, és mennyire tudunk a világegyetemről? Tudjuk-e, honnan jött és hová tart? Volt-e kezdete, és ha igen, mi volt előtte? Milyen az idő természete? Befejeződik-e valamikor? Részben az új, fantasztikus műszaki csodák eredményeképpen több ponton is áttörést sikerült elérni a fizikában, s immár sejtjük a választ a régóta megválaszolatlan kérdések némelyikére. Ezek a válaszok egyszer majd olyan természetesek lesznek számunkra, mint az, hogy a Föld a Nap körül kering - vagy éppenséggel olyan nevetségesek, mint a teknősbékatorony. Az idő (akármi légyen is az) meghozza majd döntését. Arisztotelész, a görög filozófus már időszámításunk előtt 340-ben két kitűnő érvet tudott felhozni A mennyekről c. könyvében amellett, hogy a Föld gömbölyű és nem lapos. Először is felismerte a holdfogyatkozás okát: azt, hogy ilyenkor a Föld a Nap és a Hold közé kerül. A Föld mindig kerek árnyékot vet a Holdra, ez pedig csak akkor lehetséges, ha a Föld maga gömbölyű. Ha lapos lenne, árnyéka nyújtott, ellipszis alakot venne fel, hacsak nem kizárólag akkor van holdfogyatkozás, amikor a Nap éppen a Föld tányérjának közepe alatt áll. Másodszor, a sokat utazó görögök tudták, hogy délebbről nézve az Északi Sarkcsillag alacsonyabban látszik az égbolton, mint az északi tartományokból. (Mivel az Északi Sarkcsillag az Északi Sark fölött áll, az ottani megfigyelő éppen a feje fölött látná, az Egyenlítőről nézve azonban pontosan a horizonton fénylik.) Arisztotelész még a Föld kerületére vonatkozó becslést is közzétett, melyet az Északi Sarkcsillag Egyiptomban, illetve Görögországban észlelt látszólagos helyzete alapján határozott meg. 400 000 stadion hosszúságúnak találta a Föld kerületét. Nem tudjuk pontosan, milyen hosszú volt egy stadion, de úgy 200 méter lehetett. Arisztotelész becslése tehát mintegy kétszerese a ma elfogadott értéknek. A görögök egy további érvet is felhozhattak a Föld gömbalakja mellett: hogyan lehetne mással magyarázni, hogy a partról a közeledő hajónak előbb látszik a vitorlája, és csak azután a törzse? Arisztotelész azt tanította, hogy a Föld mozdulatlan, és a Nap, a Hold, a bolygók meg a csillagok körpályákat járnak be körülötte. Misztikus alapokon vélekedett így, ugyanis a Földet a világegyetem központjának tartotta, a körpályát pedig a legtökéletesebbnek. Elméletét Ptolemaiosz fejlesztette teljes kozmológiai modellé az időszámításunk utáni 1. században. E modell szerint a mindenség középpontjában álló Földet nyolc szféra fogja körül. Ezeken mozog a Nap, a Hold, az összes csillag

és az akkor ismert öt bolygó: a Merkúr, a Vénusz, a Mars, a Jupiter és a Szaturnusz (1.1. ábra). A bolygók a megfelelő szférákhoz illeszkedő kisebb körpályákon



1.1 ÁBRA

mozognak; ezzel lehetett értelmezni eléggé bonyolult látszólagos pályájukat. A legkülső szférán az úgynevezett állócsillagok helyezkednek el. Ezek egymáshoz képest mozdulatlanok, de együtt forognak az égbolttal. Nem sok szót vesztegettek arra, hogy mi lehet a legkülső szférán túl; annyi bizonyos volt, hogy az már nem tartozik az ember által megfigyelhető univerzumhoz.

Ptolemaiosz modellje elfogadhatóan pontos rendszert kínált az égitestek mindenkori helyzetének előrejelzéséhez. A kellő pontosság eléréséhez azonban fel kellett tételezni, hogy a Hold pályája néha fele olyan távol fut a Földtől, mint máskor. Akkor viszont a Holdnak kétszer akkorának kellene látszania! Ptolemaiosz maga is felismerte ezt a hibát, ennek ellenére modellje eléggé elterjedt, ha nem is vált általánossá. A keresztény egyház elfogadta ezt a modellt, mint olyant, amely összhangban van a Szentírással, hiszen bőségesen hagy helyet az állócsillagok szféráján túl a mennyországnak és a pokolnak.

Mégis egy pap, a lengyel Mikolaj Kopernikusz dolgozta ki a ptolemaioszinál egyszerűbb modellt

1514-ben. (Talán attól tartva, hogy egyháza eretneknek bélyegzi, Kopernikusz kezdetben névtelenül köröztette elméletét.) Elgondolása azon alapult, hogy a Nap áll a középpontban, a Föld és a bolygók pedig körpályán keringenek körülötte. Közel száz év telt el, míg elkezdték komolyan venni modelljét. Két csillagász: a német Johannes Kepler és az olasz Galileo Galilei nyilvánosan támogatni kezdte ezt a világképet, annak ellenére, hogy a Kopernikusz által megjósolt pályák nem minden esetben feleltek meg a megfigyelteknek. Az arisztotelészi-ptolemaioszi világkép 1609-ben szenvedte el a végső csapást. Ebben az évben kezdte Galilei az éppen akkor feltalált távcsővel figyelni az éjszakai eget. A Jupiter bolygót tanulmányozva feltűnt neki, hogy több hold is kering körülötte. Ez bizony arra utalt, hogy korántsem kering minden a Föld körül, ahogy Arisztotelész és Ptolemaiosz tanította. (Természetesen továbbra is lehetséges volt, hogy a Föld a világmindenség mozdulatlan középpontja; és a Jupiter holdjai rendkívül bonyolult, Föld körüli pályán haladnak, azt a látszatot keltvén, hogy a Jupiter körül keringenek. Kopernikusz elmélete azonban sokkal egyszerűbb.) Johannes Kepler pedig módosította elméletét, feltételezvén, hogy a bolygók nem kör-, hanem ellipszispályán keringenek (az ellipszis nem más, mint egy megnyúlt kör). Az előrejelzések most már megegyeztek a megfigyelésekkel.

Kepler az ellipszispályákat alkalmi hipotézisnek tekintette, méghozzá fölötte visszataszító hipotézisnek, mivel az ellipszis nyilvánvalóan tökéletlenebb a körnél. Szinte véletlenszerűen felfedezte, hogy az ellipszispályák jól illeszkednek a megfigyelésekhez, ezeket viszont sehogy se tudta összeegyeztetni azzal az elképzelésével, hogy a bolygókat mágneses erők tartják a Nap körül pályán. Csak sokkal később, 1687-ben született válasz erre a problémára, amikor Sir Isaac Newton megírta Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (A természetfilozófia matematikai alapjai) c. művét, amely valószínűleg minden idők legjelentősebb fizikai tárgyú könyve. Nem csupán a testek térbeli mozgásának elméletére vonatkozó elképzeléseit tette itt közzé Newton, hanem kidolgozta a leírásukhoz szükséges matematikai apparátust is. Emellett megfogalmazta az általános gravitáció törvényét, mely szerint a világmindenségben bármely testet vonzza az összes többi; a vonzóerő annál nagyobb, minél nagyobb tömegűek a testek és minél közelebb vannak egymáshoz. Ugyanez az erő okozza, hogy a tárgyak leesnek a földre. (Szinte bizonyosan kétes annak az anekdotának a hitele, mely szerint Newtont a fejére pottyanó alma inspirálta. Maga Newton mindössze annyit mondott, hogy "merengő hangulatban" üldögélt, amikor a gravitáció ötlete megszületett a fejében, s hogy ezt "egy lehulló alma váltotta ki".)

A továbbiakban Newton kimutatta, hogy törvénye értelmében a gravitáció elliptikus Föld körüli pályára kényszeríti a Holdat, mint ahogy a bolygók is elliptikus pályákon keringenek a Nap körül. A kopernikuszi modell megszabadult Ptolemaiosz égi szféráitól, s ezzel attól az elméletétől is, amely szerint a világegyetemnek természetes határa volna. Mivel nem úgy látszott, mintha az "állócsillagok" megváltoztatnák egymáshoz viszonyított helyzetüket - eltekintve az égbolttal együtt forgástól, mely a Föld forgásának következménye -, magától értetődően adódott a feltevés, hogy ezek is a Naphoz hasonló objektumok, csak sokkal távolabb vannak tőlünk. Newton felismerte, hogy gravitációs törvényének értelmében a csillagoknak is vonzaniuk kell egymást, ezért úgy tűnt, hogy nem maradhatnak gyakorlatilag mozdulatlanok. Vajon nem zuhannak-e majd egymásba egyszer? Egyik levelében, melyet 1691-ben írt Richard Bentley-hez, korának másik jelentős gondolkodójához, Newton azzal érvelt, hogy erre elkerülhetetlenül sor is kerülne, ha csupán véges sok csillag létezne, véges nagy térrészben. Ha azonban végtelen sok csillag többé-kevésbé egyenletesen oszlik el a végtelen világűrben, akkor nem kerülhet sor erre, mivel nem létezne olyan középpont, amelybe az égitestek belehullhatnának.

Ez az érvelés kitűnő példája annak a csapdának, mellyel oly könnyen szembetalálkozunk, ha a végtelenről kezdünk beszélgetni. A végtelen világegyetemben bármely pontot középpontnak tekinthetünk, hiszen minden oldalról végtelen sok csillag veszi körül. Csak sokkal később ismerték fel a probléma helyes megközelítésének módját: véges helyzetet kell feltételezni, melyben a csillagok egymás felé zuhannak, utána megvizsgálni, hogyan változnak meg a dolgok, ha a vizsgált területen kívül további csillagokat adunk a rendszerhez, nagyjából egyenletesen elosztva. Newton törvényének értelmében az új csillagok átlagosan semmiféle hatást sem gyakorolnak az eredetiekre,

azok tehát ugyanolyan gyorsan zuhannak egymás felé továbbra is. Akárhány csillagot adunk is hozzá, a halmaz mégis összeomlik. Ma már tudjuk, hogy lehetetlen felállítani a világegyetem végtelen, statikus modelljét, melyben a gravitáció mindig vonzó irányú. Érdekes és jellemző a huszadik század előtti szellemi légkörre, hogy senki se tételezte fel a világegyetem összehúzódásának vagy tágulásának lehetőségét. Általánosan elfogadták, hogy az univerzum vagy változatlan állapotban létezett mindig, vagy valamely véges idővel ezelőtt teremtődött többé-kevésbé olyannak, amilyennek ma látjuk. Ez részben az emberek ama hajlamának is tulajdonítható, hogy higgyenek az örök igazságokban; emellett vigaszt is meríthettek a tudatból, hogy noha ők maguk megöregszenek és meghalnak, a mindenség örökkévaló és változatlan.

Még akik felismerték, hogy Newton gravitációs elmélete szerint a világegyetem nem lehet statikus, még ők se gondoltak rá, hogy akár tágulhat is. Inkább az elmélete módosításával próbálkoztak: igen nagy távolságok esetén taszítónak tekintették a gravitációs erőt. Ez nem befolyásolta számottevően a bolygók mozgására vonatkozó előrejelzéseket, lehetővé tette viszont, hogy végtelen sok csillag esetén fennmaradjon az egyensúlyi állapot - ebben a közeli csillagok között fellépő vonzóerőt a távoliak taszító ereje egyenlíti ki. Ma mégis úgy tartjuk, hogy az efféle egyensúly instabil lenne: ha valamely térrészben a csillagok csak kis mértékben is közelednének egymáshoz, felerősödne a köztük ható vonzóerő és elnyomná a taszító erők hatását, így a csillagok tovább zuhannának egymás felé. Másfelől pedig, ha a csillagok picit eltávolodnának egymástól, a taszítás válna meghatározóvá, és egyre messzebb űzné őket. Általában Heinrich Olbers német filozófusnak tulajdonítják a végtelen, statikus világegyetem elleni másik érvet. Olbers 1823-ban írta le elméletét. Ami azt illeti, a kérdést már Newton kortársai is felvetették, és még csak nem is Olbers cikke volt az első, amely elfogadható érvelést tartalmazott. Mindazonáltal ez keltett elsőnek figyelmet széles körben. Arról a problémáról van szó, hogy a végtelen, statikus világegyetemben bárhova nézünk, pillantásunknak egy csillag felszínére kell esnie. Ezért joggal várhatnánk el, hogy az égbolt még éjszaka is ugyanolyan fényesen ragyogjon, mint a Nap. Olbers ellenérve szerint a távoli csillagok fényét elhalványítaná a csillagközi anyag fényelnyelése. Ez esetben azonban a csillagközi anyag lassanként felmelegedne, míg végül ugyanolyan fényesen sugározna, mint a csillagok. Csak egyféleképpen kerülhetjük el azt a következtetést, hogy az éjszakai égboltnak ugyanolyan fényesen kell világítania, mint a Nap felszínének: ha feltételezzük, hogy a csillagok nem öröktől fogva világítanak, hanem valamikor a múltban kezdtek ragyogni. Ez esetben vagy a fényelnyelő anyag nem melegedett még fel, vagy a távoli csillagok fénye még nem ért el hozzánk. Ez a lehetőség újabb kérdést vet fel: mi okozhatta, hogy a csillagok egyáltalán világítani kezdtek?

A világegyetem kezdetéről természetesen nem ekkor kezdtek vitatkozni. Számos korai kozmológia és a zsidó-keresztény-mohamedán tradíció szerint a világegyetem véges idővel ezelőtt, a nem túl távoli múltban keletkezett. Emellett szólt egyebek között az a vélekedés, hogy a világegyetem létének megmagyarázásához szükség van egy "első okra". (A világegyetemen belül bármely esemény bekövetkezése megmagyarázható valamely korábbi eseménnyel, magának a világmindenségnek a létezése viszont csak akkor magyarázható ilyen módon, ha valamikor elkezdődött.) Szent Ágoston más érvet kínál Isten városa c. könyvében. Rámutat, hogy a civilizáció fejlődése során emlékszünk rá, ki hajtotta végre ezt vagy azt a tettet, ki fedezte fel ezt vagy azt az eljárást. Így az ember, és talán a világmindenség is, csak viszonylag rövid ideje létezhet. Szent Ágoston a Teremtés Könyve alapján úgy véli, hogy a világegyetem teremtésére időszámításunk előtt 5000 körül kerülhetett sor. (Érdekes, hogy ez az időpont nincs is olyan messze az utolsó jégkorszak végétől, azaz kb. i. e. 10000-től, amikor a régészek szerint megszületett az emberi civilizáció.).

A görög filozófusok többségéhez hasonlóan Arisztotelész sem kedvelte a teremtés ötletét, mert az túl sok isteni beavatkozást tételez fel. Szívesebben hitték, hogy az emberi faj és az őt körülvevő világ mindig létezett és örökké fennmarad. Az ókoriak is meggondolták a fenti érvelést a civilizáció fejlődéséről, de elutasították, mondván: a vissza-visszatérő özönvizek és más katasztrófák ismételten visszavetették az emberiséget a civilizáció kezdetéig.

A világegyetem időbeli kezdetének és a tér korlátozott voltának kérdését behatóan vizsgálta a híres

filozófus, Immanuel Kant monumentális (és fölöttébb obskúrus) könyvében, az 1781-ben napvilágot látott A tiszta ész kritikájában. A tiszta ész antinómiáinak (azaz ellentmondásainak) nevezte e kérdéseket, mivel úgy találta, hogy egyaránt nyomós érvek léteznek a tézis - tehát a világegyetem kezdete - és az antitézis - tehát a világegyetem örökkévaló volta - mellett. A tézis melletti érve szerint, ha a világegyetemnek nem volna kezdete, akkor bármely esemény bekövetkezését végtelen hosszú idő előzné meg. Ezt képtelenségnek tekintette. Az antitézisre vonatkozó érve szerint viszont, ha volna kezdete a világegyetemnek, akkor ezt az időpontot előzné meg egy végtelen időtartam. Ekkor pedig miért lenne bármelyik időpont kitüntetve a világegyetem keletkezésével? Kant voltaképpen ugyanazt az érvet alkalmazza a tézisre, mint az antitézisre. Mindkét érv azon a hallgatólagos feltételezésen alapszik, hogy az idő a végtelenségig terjed a múltban, akár örökkön létezett az univerzum, akár nem. Mint majd látni fogjuk, az idő fogalmának nincs értelme a világegyetem keletkezése előtt. Erre Szent Ágoston mutatott rá először. Arra a kérdésre, hogy mit tett Isten, mielőtt megteremtette volna a világmindenséget, Ágoston nem azt felelte: a Poklot készítette az ilyen kérdések kiagyalóinak. Ehelyett kifejtette, hogy az idő az Isten által teremtett világegyetem sajátsága, s a világegyetem létrejötte előtt nem létezett.

Amíg az emberek többsége a lényegében változatlan, statikus univerzumban hitt, a kezdet kérdése tulajdonképpen a metafizikára vagy a teológiára tartozott. Az észleleteket mindkét elmélet egészen jól megmagyarázta: az is, amely szerint a világegyetem öröktől fogva létezett, és az is, amely szerint a világegyetem véges idővel ezelőtt, oly módon lendült mozgásba, hogy azt a látszatot keltse, mintha mindig létezett volna. 1929-ben azonban Edwin Hubble a csillagászat történetében mérföldkőnek minősülő felfedezéssel állt elő: akármerre nézünk, a távoli galaxisok rohamosan távolodnak tőlünk.

Más szavakkal: a világegyetem tágul. Az égitestek régebben nyilván közelebb voltak egymáshoz. Tulajdonképpen úgy látszott, hogy mintegy tíz-húsz milliárd évvel ezelőtt lennie kellett olyan időpontnak, amikor valamennyi objektum ugyanott tartózkodott, következésképp a világmindenség sűrűsége elérte a végtelent. Ez a felfedezés nyitotta meg végre a tudomány birodalmát a világegyetem keletkezésének problémája előtt.

Hubble megfigyelései azt sejtetik, hogy bizonyos időpontban - az ősrobbanás, a Nagy Bumm idején - a világegyetem végtelen kis méretű és végtelen nagy sűrűségű volt. Ilyen körülmények között érvényét veszti a tudomány összes törvénye, tehát lehetetlenné válik a jövőbeni események előrejelzése. Ha voltak is események a Nagy Bumm időpontja előtt, semmiféle hatást sem gyakorolhattak jelenlegi körülményeinkre. Létezésüket figyelmen kívül hagyhatjuk, mivel semmiféle megfigyelhető következménnyel se jártak. Úgy is mondhatnánk, hogy az idő a Nagy Bumm pillanatában kezdődött, amennyiben az ennél korábbi időpontok teljesen határozatlanok. Nyomatékosan meg kell jegyeznünk, hogy az időnek ilyen értelmű kezdete merőben más, mint ahogy azt korábban kezelték. Változatlan mindenségben az idők kezdete olyasvalami, amiről csak valamely, a mindenségen kívül álló lény gondoskodhat; fizikai értelemben nincs kezdetre szükség. Egészen jól elképzelhetnénk, hogy Isten a világot a szó szoros értelmében bármikor teremtette. Másfelől viszont, ha a világegyetem tágul, akkor fizikai okok is megkövetelhetik a kezdetet. Még mindig vélhetnénk, hogy Isten a Nagy Bumm pillanatában teremtette a világot, vagy később, de úgy, hogy olyannak lássék, mintha ősrobbanással indult volna minden. Értelmetlen volna azonban azt feltételezni, hogy az ősrobbanás előtt teremtette. A táguló világegyetem nem zárja ki a Teremtő létét, de kétségkívül megszabja neki, hogy mikor végezhette el feladatát. Ahhoz, hogy a világegyetem természetéről beszélgethessünk, hogy megvitathassuk, van-e kezdete és vége, először tisztáznunk kell, milyen is a tudományos elmélet. Az én egyszerű elképzelésem szerint az elmélet csupán a világegyetem modellje vagy éppen részleges modellje; olyan szabályok gyűjteménye, melyek megfigyeléseinkhez rendelik a modell mennyiségeit. Az elmélet csak a mi elménkben létezik, ezen túl semmi realitása nincs (akármit jelentsen is ez). A jó elmélet két feltételnek tesz eleget: viszonylag kevés önkényes elemet tartalmazó modell alapján pontosan leírja a megfigyelések jelentős csoportját; de határozott előrejelzésekkel is szolgál jövőbeni megfigyelések eredményeiről. Így például Arisztotelész elmélete, mely szerint minden anyag négy elemből áll -

föld, levegő, tűz, víz - kellőképpen egyszerű ugyan, de nem tesz semmiféle előrejelzést. Newton gravitációs elmélete még egyszerűbb modellen alapul: azon, hogy a testek vonzzák egymást, s a vonzóerő arányos a tömegükkel és fordítottan arányos a távolságuk négyzetével. S lám: ez az egyszerű modell mégis nagy pontossággal megjósolja a Nap, a Hold és az összes égitest mozgását.

A fizika összes elmélete ideiglenes, amennyiben mind hipotézis csupán: sosem lehet bebizonyítani őket. Akárhány ízben egyeznek is a kísérletek eredményei az elmélet jóslataival, sosem lehetünk biztosak benne, hogy a következő eredmény is alátámasztja majd az elméletet. A cáfolathoz viszont elegendő, ha akárcsak egyetlen megfigyelés is ellentmond az előrejelzésnek. Karl Popper tudományfilozófus külön kiemelte: a jó elméletet éppen az jellemzi, hogy számos olyan előrejelzést tartalmaz, melyeket a megfigyelések elvileg megcáfolhatnak. Az elmélet mindaddig érvényben marad, belévetett bizalmunk mindaddig nő, amíg az új kísérletek eredményei megfelelnek az előrejelzéseknek; egyetlen, ellenkező értelmű megfigyelés után azonban kénytelenek vagyunk elvetni vagy módosítani teóriánkat. Legalábbis ennek kéne történnie; persze mindig megkérdőjelezhető a megfigyelést végző személy kompetenciája.

A valóságban az új elmélet gyakran nem más, mint a régi kiterjesztése. Így például nagyon gondos megfigyelésekkel kimutatták, hogy pici eltérés létezik a Merkúr bolygó tényleges mozgása és a Newton gravitációs elméletéből számolt pályaadatok között. Einstein általános relativitáselmélete csekély eltérést jósolt a newtoni elmélettől. Az új elmélet egyik kulcsfontosságú bizonyítéka éppen az volt, hogy Einstein jóslata megegyezett a tapasztalattal, Newtoné pedig nem. Mindazonáltal gyakorlati célokra továbbra is Newton teóriáját használjuk, mivel mindennapi helyzeteinkben elenyészően kicsi a klasszikus elmélet és a relativitáselmélet jóslatainak különbsége. (Newton elméletének további óriási előnye, hogy sokkal egyszerűbben lehet dolgozni vele, mint Einsteinével.)

A tudomány a világmindenség egészének leírására alkalmas, egységes elmélet kidolgozására törekszik. A legtöbb tudós módszere mégis a probléma kétfelé osztásán alapul. Egyfelől a világegyetem időbeli változásait leíró törvényekkel foglalkoznak. (Ha tudjuk, milyen a világegyetem egy tetszőleges időpontban, akkor ezek a fizikai törvények megmondják, milyen lesz bármely későbbi időpontban.) Másfelől pedig felvetik a világegyetem kezdeti állapotának kérdését. Néhányan azt tartják, hogy csak az első kérdés tartozik a tudományra; a világmindenség kezdeti állapotát metafizikai vagy vallási problémának tekintik. Véleményük szerint az Isten mindenható, ezért tetszőleges módot választhatott az univerzum "elindításához". Meglehet, hogy így van; ekkor viszont teljesen önkényes fejlődési irányokat is kijelölhetett volna. A jelek szerint nem ezt tette: a világegyetem viselkedése nagyon is szabályos, és engedelmeskedik bizonyos törvényeknek. Ezért ugyanilyen ésszerűnek tűnik az a föltevés is, hogy már a kiindulási időszakot is törvények kormányozták.

Olyan elméletet kellene alkotni, amely egy nekifutásra írja le az egész mindenséget. Kemény dió. Ezért inkább felaprózzuk a problémát, és részleges érvényű elméleteket dolgozunk ki. E részleges elméletek érvénye csupán a megfigyelések bizonyos csoportjaira terjed ki, a leírások és előrejelzések elhanyagolják vagy egyszerűen számokkal reprezentálják a többi jelenség hatását. Elképzelhető, hogy ez a közelítés alapjaiban rossz. Ha a világegyetemben minden alapvetően függ minden mástól, akkor a probléma elkülönített részleteinek vizsgálata talán sohasem hozhatja elérhető közelségbe a teljes értékű megoldást. Mindazonáltal kétségtelen, hogy a múltban éppen ezzel a módszerrel sikerült előbbre jutnunk. A gravitáció newtoni elmélete e haladásnak is iskolapéldájául szolgál. Az elmélet szerint két test közötti vonzóerő a testekre jellemző egyetlen számadattól - a tömegtől - függ, és egyáltalán nem befolyásolja a testek anyaga. Ezért nincs szükség a Nap és a bolygók szerkezetének és felépítésének elméletére a pályák kiszámításához.

Manapság a tudósok két részleges elmélet: az általános relativitáselmélet és a kvantummechanika alapján szemlélik a világmindenséget. Mindkettő századunk első felének nagyszerű szellemi teljesítménye. Az általános relativitáselmélet a gravitációs erőt és a világegyetem nagyléptékű szerkezetét írja le, azaz a néhány kilométeres mérettől a millió millió millió millió (huszonnégy

nulla az 1 után) kilométeres méretig, tehát a megfigyelhető univerzum határáig. A kvantummechanika pedig a másik véglettel, az egészen kicsiny mérettartományokban - a centiméter milliomod részének milliomod része közelében - lejátszódó jelenségekkel foglalkozik. Sajnos tudjuk, hogy a két elmélet sehogy se fér össze egymással; mindkettő egyidejűleg nem lehet helyes. Az összekapcsolásukra, a gravitáció kvantumelméletének kidolgozására irányuló törekvések a mai fizika egyik legfontosabb kutatási irányzatát jelentik, s egyszersmind e könyv fő témájául is szolgálnak. Egyelőre nem rendelkezünk ezzel az elmélettel, s lehet, hogy hosszú utat kell még megtennünk, míg megszerezzük, de számos tulajdonságát máris nagy valószínűséggel ismerjük. S mint majd a későbbi fejezetekben látjuk, elég sokat tudunk a gravitáció kvantumelméletétől elvárható előrejelzésekről is.

Ha elhisszük, hogy a világegyetem nem a saját feje után megy, hanem szigorú törvények irányítják, akkor előbb-utóbb össze kell hangolnunk a részleges elméleteket, hogy az egységes elmélettel mindent leírhassunk a világegyetemben. Az általános, egységes elmélet keresése azonban alapvető ellentmondást hordoz. A tudományos elméletekről fentebb vázolt elgondolások azon a feltevésen alapszanak, hogy az ember értelmes lény, aki szabadon, tetszése szerint tanulmányozhatja a mindenséget, és a látottakból logikus következtetéseket vonhat le. Ilyen esetben ésszerű a föltételezés, hogy egyre közelebb kerülünk a világegyetemünket kormányzó törvények megismeréséhez. Ha azonban valóban létezik az átfogó, egységes elmélet, akkor az valószínűleg a mi cselekedeteinket is megjósolja. Ezért maga az elmélet határozná meg a feltalálására irányuló kutatások eredményét! S ugyan miért biztosítaná, hogy éppen a megfelelő következtetéseket vonjuk le tapasztalatainkból? Nem határozhatná-e meg - ugyanakkora valószínűséggel - esetleg azt, hogy kifejezetten rossz eredményre jussunk? Vagy egyáltalán semmilyenre sem?

Az egyetlen válasz, amit erre a kérdésre javasolni tudok, Darwin elméletén, a természetes kiválasztódáson alapszik. Miről van itt szó? Szaporodásra képes szervezetek populációjában az egyes tagok génállománya és nevelkedési körülményei eltérőek. E különbségek révén néhány egyed másoknál tehetségesebb lesz abban, hogy a helyes következtetésekre jusson az őt körülvevő világ dolgairól, és a megfelelő módon cselekedjék. Túlélési és szaporodási esélyeik ezért jobbak lesznek a többiekénél, így viselkedés- és gondolkodásmódjuk uralkodóvá válik. Mindaz, amit intelligenciának és tudományos felfedezésnek nevezünk, a múltban kétségkívül javította a túlélési esélyeket. Ma már korántsem ilyen tiszta a helyzet: tudományos felfedezéseink könnyen elpusztíthatnak minket, s ha erre nem is kerül sor, kérdéses, hogy a teljes, egységes elmélet megalkotása számottevően javítaná-e a túlélés lehetőségeit. Mindenesetre, ha a világegyetem valóban szabályszerűen fejlődött, számíthatunk rá, hogy a természetes kiválasztódás során megerősödött logikai képességeink a teljes, egyesített elmélet vonatkozásában sem hagynak cserben bennünket, s így nem jutunk helytelen következtetésekre.

A jelenleg rendelkezésünkre álló részleges elméletek, a legszélsőségesebb helyzetektől eltekintve, kielégítően pontos előrejelzést nyújtanak. Meglehetősen nehéz tehát gyakorlati szempontokkal indokol ni az átfogó elméletre irányuló kutatásokat. (Érdemes mégis megjegyeznünk, hogy a relativitáselmélet és a kvantummechanika ellen is használhattak hasonló érveket, márpedig ezeknek az elméleteknek köszönhetjük az atomenergiát és a mikroelektronikai forradalmat!) Elképzelhető tehát, hogy a teljes, egységes elmélet felfedezése nem javítja fajunk túlélésének esélyeit. Talán életvitelünket se befolyásolja. Az emberek azonban a civilizáció hajnala óta elégedetlenek, ha összefüggéstelen, értelmezhetetlen eseményekkel találkoznak. Mindig vágytak rá, hogy megértsék az őket körülvevő világ alapvető összefüggéseit. Ma is tudni szeretnénk, honnan jöttünk, és mi végre vagyunk a világon. Vizsgálódásaink folytatására elegendő igazolást nyújt az emberiség mélységes tudásszomja. S nem érjük be kevesebbel: világegyetemünk teljes megismerésére törekszünk.

2

TÉR ÉS IDŐ

A testek mozgásáról alkotott jelenlegi elképzeléseink Newton és Galilei korában keletkeztek.

Korábban Arisztotelésznek hittek az emberek; ő azt tanította, hogy bármely test természetes állapota a nyugalom, s hogy a test mozgásban tartásához erőre vagy impulzusra van szükség. Ebből kővetkezett, hogy a nehezebb testnek gyorsabban kell esnie, mint a könnyebbeknek, mivel nagyobb erő vonzza a föld felé.

Az arisztotelészi hagyomány szerint a világegyetemet kormányzó összes törvény pusztán gondolati úton feltárható, megfigyeléssel fölösleges ellenőrizni őket. Így egészen Galilei színre lépéséig senki. se vesződött azzal, hogy megnézze: tényleg különböző sebességgel esnek-e a különböző súlyú testek. Állítólag Galilei úgy bizonyította be Arisztotelész tanításának hibás voltát, hogy súlyokat ejtett le a pisai ferde toronyból. Csaknem teljesen bizonyos, hogy ez a történet csak mese, bár Galilei tényleg elvégzett egy ezzel egyenértékű kísérletet: különböző súlyú golyókat gurított le egy sima lejtőn. A helyzet hasonló a nehéz testek szabadeséséhez, de a kisebb sebességek miatt könnyebben lehet megfigyeléseket végezni. Galilei mérései azt mutatták, hogy a testek sebessége ugyanolyan arányban nő, akármekkora is a súlyuk. Ha például olyan lejtőn gurítjuk el golyónkat, amelynek minden tíz méteren egy méter esése van, akkor a golyó az első másodperc végén egy méter/másodperc sebességgel, a második végén két méter/másodperc sebességgel halad, és így tovább; függetlenül attól, hogy milyen nehéz a golyó. Nyilvánvaló, hogy egy ólomdarab gyorsabban esik, mint egy madártoll, de ennek egyedüli oka, hogy a levegő ellenállása lelassítja a tollat. Ha olyan testeket ejtünk le, amelyeknek nincs számottevő légellenállásuk, például két különböző súlyú ólomdarabot, akkor egyforma sebességeket észlelünk.

Newton Galilei mérési eredményeire alapozta mozgástörvényeit. Galilei kísérleteiben a lefelé gördülő golyóra mindig ugyanaz az erő - saját súlya - hat, s az eredmény a sebesség állandó növekedése. Következésképp a korábbi vélekedéssel szemben az erő igazi hatása a test sebességének megváltoztatásában, s nem csupán a test megmozdításában nyilvánul meg. Az a test pedig, amelyre nem hat erő, egyenes vonalú, egyenletes sebességű mozgást végez. Ez az állítás Newton 1687-ben megjelent Principa Mathematicájában fogalmazódott meg először határozott formában; ma Newton első törvényeként emlegetjük. Newton második törvénye azt mondja meg, mi történik a testtel, ha erő hat rá. Ilyenkor gyorsulás - azaz sebességváltozás - lép fel, melynek mértéke arányos az erővel. (Kétszer akkora erő tehát kétszer akkora gyorsítást eredményez.) Ha a test tömege (anyagának mennyisége) nagyobb, a gyorsulás kisebb lesz. (Ha ugyanakkora erő kétszer akkora tömegű testre hat, feleakkora gyorsulást okoz.) Ezt mindannyian tapasztalhatjuk az autóknál: minél erősebb a motor, annál jobban, és minél nagyobb az önsúlya, annál rosszabbul gyorsul a kocsi.

A mozgástörvények mellett Newton felismerte a gravitációs erőt leíró törvényt is. Eszerint minden test vonz minden testet, és a vonzóerő arányos a testek tömegével. Ezért két test között kétszeresére növekszik a vonzóerő, ha az egyik test (mondjuk az A) tömegét megkettőzzük. Ez eléggé természetes, hiszen az új A testet úgy is elképzelhetjük, mintha két, eredeti testből állna. Ezek mindegyike az eredeti erővel vonzza a B testet. Tehát az A és B között ható teljes erő az eredeti kétszerese lesz. Ha pedig az egyik test tömegét megkétszerezzük és a másikét megháromszorozzuk, a vonzás ereje hatszoros lesz. Így már érthető, miért esnek azonos sebességgel a testek: a kétszer akkora súlyú testre ugyan kétszer akkora gravitációs erő hat, de a tömege is kétszeres. Newton második törvénye értelmében ez a két hatás éppen kioltja egymást, ezért a gyorsulás minden esetben azonos marad.

Newton gravitációs törvényéből az is következik, hogy minél távolabb vannak a testek egymástól, annál kisebb közöttük a vonzóerő. E törvény szerint valamely csillag gravitációs ereje pontosan a negyede egy feleakkora távolságra levő, hasonló csillagénak. Ez a törvény nagy pontossággal előrejelzi a Föld, a Hold és a bolygók pályáját. Ha a gravitációs törvényben a csillag vonzóereje gyorsabban csökkenne a távolsággal, akkor a bolygók pályái nem elliptikusak volnának, hanem spirálisan haladnának a Nap felé. Ha lassabban csökkenne, akkor a távoli csillagok vonzóereje felülmúlná a Földét.

A nagy különbség Arisztotelész, illetve Galilei és Newton elképzelései között az, hogy Arisztotelész

szerint a testek alapállapota a nyugalom, ezt veszik fel, ha valamely erő vagy impulzus nem mozgatja őket. Mindenekelőtt úgy vélte, hogy a Föld is nyugalomban van. Newton törvényeiből viszont az következik, hogy a nyugalomnak nincs egyértelmű vonatkoztatási pontja. Egyforma joggal mondhatjuk, hogy az A test a nyugalomban levő B testhez képest egyenletes sebességgel mozog, vagy azt, hogy az A test van nyugalomban és a B test mozog. Tekintsünk el - csak a példa kedvéért - a Föld forgásától és Nap körüli pályájától. Ekkor egyaránt mondhatjuk, hogy a Föld nyugalomban van és felszínén a vonat 150 km/órás sebességgel halad északra, vagy azt, hogy a vonat van nyugalomban, és alatta a Föld 150 km/órás sebességgel halad délre. Ha valaki mozgó testekkel kísérletezne a vonaton, Newton összes törvényét érvényesnek találná. Pingpongozás közben a vonaton azt látnánk, hogy a labda ugyanúgy engedelmeskedik Newton törvényeinek, mintha az asztalt a vágányok mellé állítottuk volna. Így tehát nem tudjuk megmondani, hogy a Föld mozog-e inkább, vagy a vonat.

A nyugalom abszolút vonatkoztatási rendszerének hiánya miatt azt sem tudjuk megállapítani, hogy különböző időben bekövetkezett két esemény a tér azonos pontján ment-e végbe. Tételezzük fel például, hogy a vonaton pingponglabdánk föl-le pattog, és egy másodperc eltéréssel kétszer egymás után ugyanarra a pontra esik az asztalon. A vágány mellett álló szemlélő szerint a labda két asztalt érése között kb. száz méter távolság van, mivel a vonat közben körülbelül ennyit halad tovább. Az abszolút nyugalom állapotának hiánya ezért azt jelenti, hogy - Arisztotelész állításával szemben - az események helye nem jelölhető ki egyértelműen a térben. Az események bekövetkezésének helye és távolsága eltérő lesz a vonaton utazó vagy az állomáson álldogáló személy számára, és semmiféle alapunk sincs, hogy egyikük vagy másikuk pozícióját előnyben részesítsük.

Newtont fölöttébb nyugtalanította az abszolút pozíció, vagy ahogy akkor mondták, az abszolút tér hiánya, mivel nem felelt meg az abszolút Istenről vallott felfogásának. Sőt, elutasította a tér abszolút voltának hiányát, holott ez éppen a saját törvényeiből következett. Ésszerűtlen viselkedése többek heves kritikáját váltotta ki, legelsőbben is Berkeley püspökéét, a filozófusét, aki szerint valamennyi anyagi tárgy, a tér, az idő mind csupán illúzió. Amikor ezt előadták a híres dr. Johnsonnak, az így kiáltott fel: - Ennyi a cáfolat! - és lábával belerúgott egy jókora kőbe.

Mind Arisztotelész, mind Newton hitt az idő abszolút voltában. Azt tanították, hogy egyértelműen megmérhető az időtartam, mely két esemény között eltelik, s hogy ez a tartam ugyanakkora lesz, akárki méri is meg, feltéve, hogy jó órát használnak. Az idő a tértől teljesen elkülönült és független. Legtöbben ezt a képet tartanák a hétköznapi tapasztalatokkal megegyezőnek. Mégis módosítanunk kellett a térről és időről alkotott felfogásunkat. A józan észre alapozott fogalmaink beválnak, amíg csak almákkal, viszonylag lassan mozgó bolygókkal vagy hasonlókkal dolgozunk, de kudarcot vallunk velük, ha a fény sebességével vagy azt megközelítő sebességgel mozgó rendszereket vizsgálunk.

Ole Christensen Roemer dán csillagász fedezte fel 1676-ban azt a tényt, hogy a fény véges, de igen nagy sebességgel terjed. Megfigyelte, hogy a Jupiter holdjai nem egyenletes időközönként haladnak el a bolygó mögött, holott ezt kellene tenniük, ha állandó sebességgel keringenének. Ahogy a Jupiter és a Föld a Nap körül keringenek, állandóan változik közöttük a távolság. Roemer megállapította, hogy minél távolabb vagyunk a Jupitertől, annál később következik be a Jupiter holdjainak fogyatkozása. Ezt azzal magyarázta, hogy amikor távolabb vagyunk, a holdak fénye később ér el bennünket. A Föld-Jupiter távolság változásait azonban nem. tudta nagyon pontosan megmérni, ezért a fény terjedési sebességére kapott 225 000 km/sec elmarad a ma elfogadott 300 000 km/sec értéktől. Ennek ellenére Roemer eredménye figyelemre méltó: nemcsak bebizonyította, hogy a fény véges sebességgel terjed, hanem meg is mérte ezt a sebességet - tizenegy évvel Newton Principa Mathematicájának megjelenése előtt.

Csak 1865-ben született alkalmas elmélet a fény terjedésének magyarázatára, amikor James Clark Maxwell brit fizikus sikerrel egyesítette az elektromosság és mágnesség erőinek leírására akkoriban használatos részleges elméleteket. Maxwell egyenletei megjósolták, hogy hullámszerű zavarok keletkezhetnek az egyesített elektromágneses térben, s hogy ezek rögzített sebességgel terjednek,

mint a fodrozódó víz hullámai. Ha a hullámok hossza (két egymást követő hullámhegy távolsága) egy méter vagy nagyobb, akkor mai szóhasználattal rádióhullámokról beszélünk. A rövidebb hullámokat mikrohullámoknak (néhány centiméter) vagy infravörös hullámoknak (a centiméter tízezred részénél nagyobbak) nevezzük. A látható fény hullámhossz-tartománya negyven- és nyolcvanmilliomod centiméter közé korlátozódik. Az ennél is rövidebb hullámhosszú sugarakat ibolyántúli, röntgen- és gamma-sugaraknak hívjuk. Maxwell elmélete megjósolta, hogy a rádió- vagy fényhullámok terjedési sebessége állandó lesz. Newton elmélete azonban leszámolt az abszolút nyugalom lehetőségével, ha tehát a fény állandó sebességgel halad, azt is meg kell mondani, hogy mihez képest. Ezért felvetették egy mindenütt jelenlevő közeg, az "éter" létezésének lehetőségét, mely még az "üres" világűrt is kitölti. A fényhullámok úgy haladnának az éterben, mint a hang hullámai a levegőben, sebességüket tehát az éterhez lehetne viszonyítani. Az éterhez képest valamely változó sebességgel mozgó megfigyelők felé a fény különböző sebességgel közeledne, de az éterhez képest állandó maradna. Ami pedig a Földet illeti, amint Nap körüli pályáján haladva az étert hasítja: nagyobb fénysebességet kellene kapnunk olyankor, amikor a Föld éteren keresztüli mozgásának irányában (a fényforrás felé haladva) mérünk, mint amikor a mozgás irányára merőlegesen (nem a fényforrás felé haladva) végezzük a mérést. 1887-ben Albert Michelson (aki később az amerikaiak közül elsőnek nyerte el a fizikai Nobel-díjat) és Edward Morley rendkívül gondos kísérletet végeztek Clevelandben, a Case School of Applied Science-ben. Összehasonlították a Föld mozgásának irányában, illetve az arra merőleges irányban észlelt fénysebességeket. Legnagyobb meglepetésükre a két adatot tökéletesen egyformának találták!

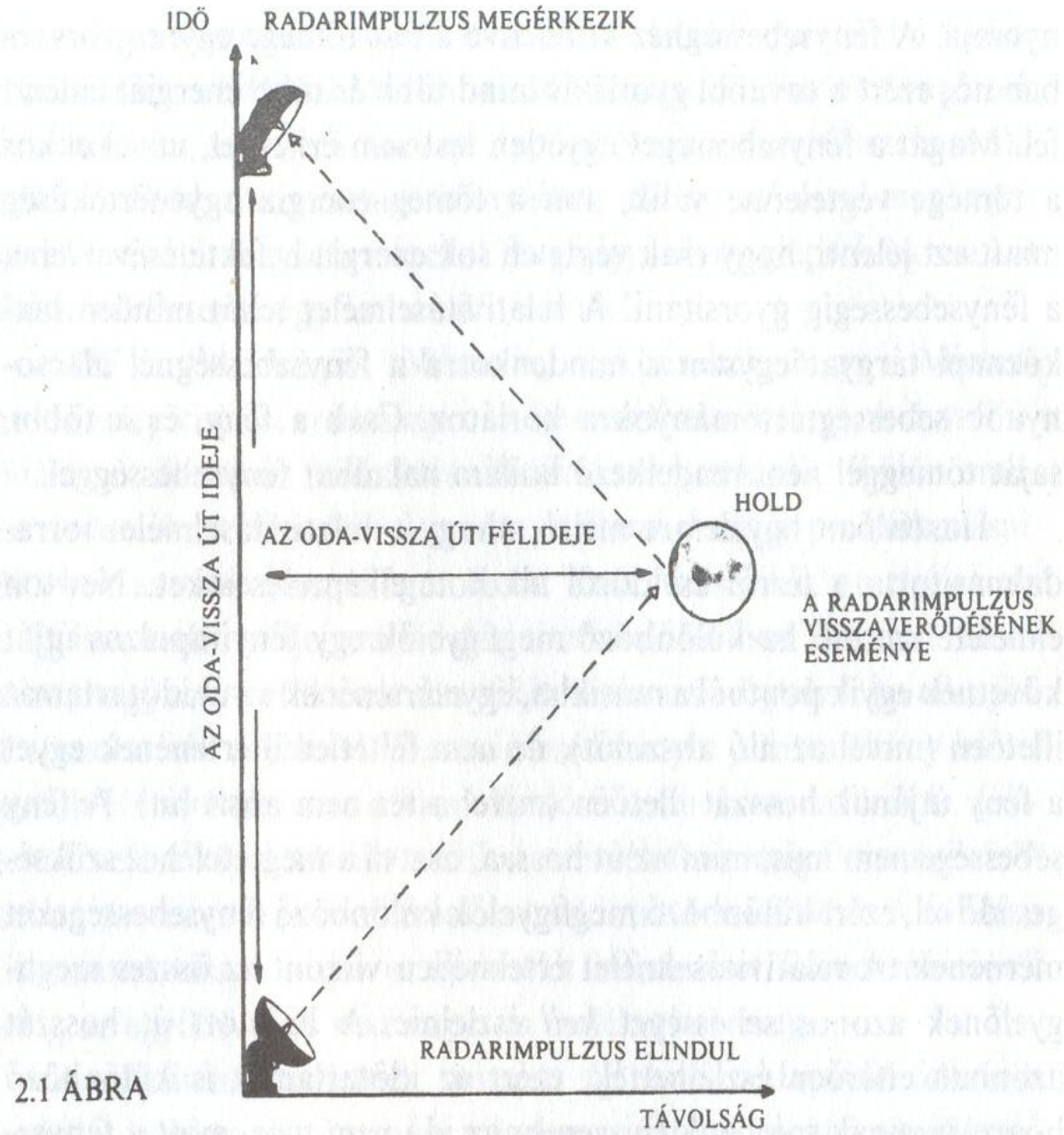
1887 és 1905 között többen is megkísérelték, hogy a Michelson-Morley kísérlet eredményét az éteren áthaladó tárgyak összehúzódásával, illetve az órák lelassulásával magyarázzák. Külön említést érdemelnek Hendrik Lorentz holland fizikus próbálkozásai. 1905-ben azonban napvilágot látott az a híres cikk, amelyben az addig ismeretlen svájci szabadalmi tisztviselő, Albert Einstein rámutatott, hogy az éter föltételezése tökéletesen szükségtelen, ha elvetjük az abszolút idő fogalmát. Hasonló eredményre jutott néhány héttel később Henri Poincaré, a kiemelkedő francia matematikus is. Einstein érvelése közelebb állt a fizikai szemlélethez, míg Poincaré elsősorban matematikai problémaként tekintette a kérdést. Általában Einsteinnek tulajdonítják az új elmélet felfedezését, Poincaré nevéről pedig az egyik fontos rész kapcsán emlékeznek meg.

A relativitáselméletnek nevezett új elmélet alapvető feltevése szerint a tudomány törvényei minden szabadon mozgó megfigyelő számára azonosak, függetlenül sebességüktől. Ez Newton mozgástörvényeire is érvényes volt, Einstein azonban Maxwell elméletére és a fény sebességére is kiterjesztette: szerinte minden megfigyelő ugyanazt a fénysebességet méri, függetlenül saját mozgásának sebességétől. Ez az egyszerű elv fölöttébb figyelemreméltó következtetésekre vezetett. Ezek közül minden bizonnyal két tétel a legismertebb; Egyikük az anyag és energia egyenértékűsége, ezt a tételt összegzi Einstein híres egyenlete: $E = mc^2$ (ahol E az energia, m a tömeg, c a fénysebesség). A másik az a tétel, amely szerint semmi se haladhat a fény sebességénél gyorsabban. A tömeg és az energia egyenértékűsége következtében a mozgó tárgy mozgási energiája hozzáadódik a tömegéhez, azaz megnehezíti a további gyorsítást. A tömegnövekedés csak a fénysebességhez közeli sebességekkel haladó tárgyak esetében válik számottevővé. Ha például egy test a fény sebességének 10%-ával halad, akkor tömege mindössze 0,5%-kal haladja meg a nyugalmi tömeget, míg a felső határ 90%-ánál már a kétszeresét nyomja. A fénysebességhez közeledve a test tömege egyre gyorsabban nő, ezért a további gyorsítás mind több és több energiát emészt fel. Magát a fénysebességet egyetlen test sem érheti el, mivel ekkor a tömege végtelenné válik, ami a tömeg-energia egyenértékűség miatt azt jelenti, hogy csak végtelen sok energia befektetésével lehet a fénysebességig gyorsítani. A relativitáselmélet tehát minden hétköznapi tárgyat egyszer s mindenkorra a fénysebességnél alacsonyabb sebességtartományokra korlátoz. Csak a fény, és a többi, saját tömeggel nem rendelkező hullám haladhat fénysebességgel.

Hasonlóan figyelemre méltó, ahogy a relativitáselmélet forradalmasította a térről és időről alkotott elképzeléseinket. Newton elmélete szerint, ha különböző megfigyelők egy fényimpulzus útját követnék egyik pontból a másikba, egyetértenének az út időtartamát illetően (mivel az idő

abszolút), de nem feltétlenül értenének egyet a fény útjának hosszát illetően (mivel a tér nem abszolút). A fény sebessége nem más, mint az út hossza, osztva a megtételéhez szükséges idővel, ezért különböző megfigyelők különböző fénysebességeket mérnének. A relativitáselmélet értelmében viszont az összes megfigyelőnek azonos sebességet kell észlelnie. A befutott út hosszát azonban eltérően észlelhették, ezért az időtartamot is különböző hosszúságúnak mérhetik (hiszen ez az idő nem más, mint a fénysebesség reciproka - amit mindenki azonosnak talál - szorozva a megtett úttal - amit azonban nem feltétlenül találnak azonosnak). Más szavakkal: a relativitás leszámolt az abszolút idő koncepciójával! Úgy látszik, hogy minden megfigyelő a saját órájával méri az időt, s hogy a különböző megfigyelők által használt, teljesen egyforma órák járása nem szükségképpen egyforma.

A megfigyelők radart is használhatnak : fényimpulzusokat vagy rádióhullámokat küldhetnek, hogy megállapítsák, mikor és hol történt egy-egy esemény. Az impulzus egy része visszaverődik az esemény bekövetkezésekor, a megfigyelő pedig méri a visszhang megérkezéséig eltelt időt. Az esemény időpontjaként az impulzus kiküldése és a visszhang vétele között eltelt idő felét fogadja el, a távolság az oda-vissza út időtartamának a fele, szorozva a fény sebességével (ebben az értelemben eseménynek tekinthetünk bármit, ami a tér egy adott pontján, egy adott pillanatban lezajlik). Ezt az elképzelést mutatja a 2.1. ábra, amely a téridő-diagramok tipikus példája.



2.1 ÁBRA

AZ IDŐT FÜGGŐLEGESEN, A MEGFIGYELŐTŐL MÉRT TÁVOLSÁGOT VÍZSZINTESEN ÁBRÁZOLJUK. A BAL OLDALI EGYENES A MEGFIGYELŐ ÚTJÁT MUTATJA A TÉRIDŐBEN. A FÉNY ÚTJÁT AZ ESEMÉNYIG ÉS VISSZA AZ ÁTLÓS VONALAK JELZIK.

A most leírt eljárást követve, az egymáshoz képest mozgó megfigyelők különböző helyeket és időket rendelnek ugyanahhoz az eseményhez. Egyik megfigyelő eredménye se pontosabb vagy helyesebb a másikénál, viszont mindegyik mérés összefügg a többivel. Bármelyik megfigyelő kiszámíthatja, hogy valamelyik társa milyen helyet és időpontot rendel az eseményhez, ha ismeri a kollégája relatív sebességét.

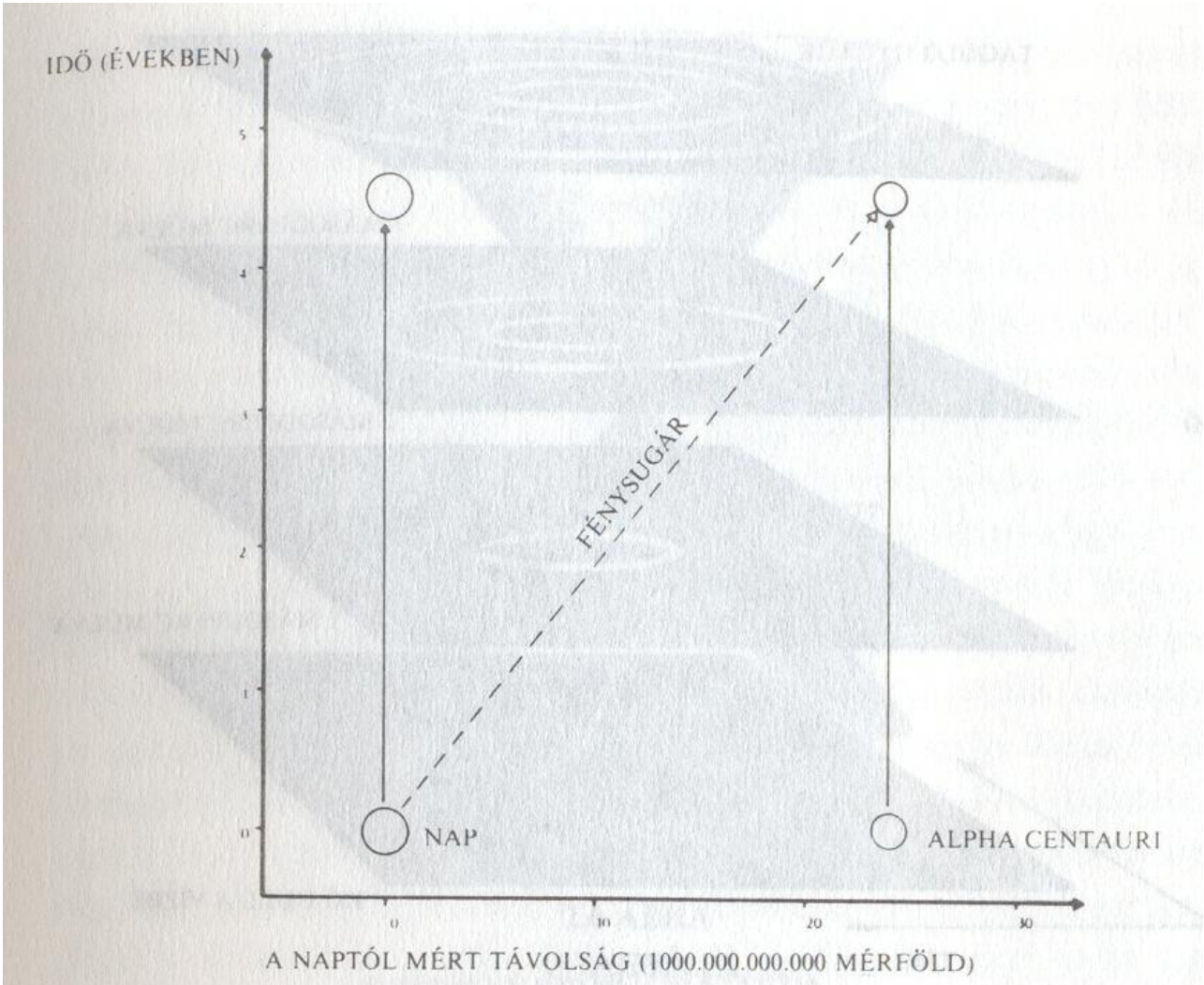
Éppen ezt a módszert használjuk ma a távolságok pontos mérésére, mivel pontosabban tudunk időt mérni, mint hosszúságot. A méter mai meghatározása szerint ugyanis ekkora távolságot tesz meg a fény 0,000 000 003335640952 másodperc alatt; az időtartamot céziumórával mérik. (Azért esett erre a sajátságos számra a választás, mert az így meghatározott távolság megegyezik a méter hagyományos definíciójával: egy Párizsban őrzött platinarúd két rovátkája közti távolsággal.) Használhatunk kényelmesebb, új hosszegységet is, a fénymásodpercet. Ez az a távolság, amelyet a fény egy másodperc alatt befut. A relativitáselmélet értelmében a távolságot az idő és a fénysebesség segítségével fejezzük ki, amiből automatikusan adódik, hogy a fénysebességet minden

megfigyelő azonosnak méri (definíció szerint l méter per 0,000000003 335 640952 másodperc). Nincs szükség tehát az éter fogalmának bevezetésére, amelynek létezését a Michelson-Morley kísérlet tanúsága szerint különben sem lehet kimutatni. A relativitáselmélet mindazonáltal arra kényszerít bennünket, hogy alapjaiban változtassuk meg a térről és időről alkotott elképzeléseinket. Tudomásul kell vennünk, hogy az idő nem különül el a tértől, és nem is független tőle, hanem - vele együtt - a téridőnek nevezett rendszert alkotja.

Hétköznapi tapasztalataink révén tudjuk, hogy bármely térbeli pont helyzete megadható három szám - a koordináták - segítségével. Így például azt mondhatjuk, hogy a szoba valamely pontja az egyik faltól két és fél méterre van, a másiktól egy méterre, és a padlótól másfél méterre. Úgy is azonosíthatunk egy pontot, hogy megadjuk a földrajzi hosszúságát, szélességét és a tengerszint feletti magasságát. Szabadon használhatunk három alkalmas koordinátát, bár figyelembe kell vennünk, hogy értelmezési tartományuk korlátozott. Senki se jellemezné a Hold helyzetét a Piccadilly Circustól északra és nyugatra mért távolságával és tengerszint feletti magasságával. Ehelyett inkább a Naptól való távolságát, pályasíkjának más bolygóktól való távolságát és azt a szöget használnánk, melyet a Hold-Nap vonal zár be például a Napot az Alfa Centaurival összekötő egyenessel, vagy más, közeli csillaghoz húzott vonallal. Még ezek a koordináták se érnének sokat, ha a Nap pozícióját kellene leírnunk a galaxisunkban, vagy a galaxisét a közeli galaxisok halmazában. Tulajdonképpen akár átfedő tartományok rendszereképpen is elképzelhetjük a világegyetemet, ahol minden tartományban új koordinátakészletet kell használnunk valamely pont helyzetének megadására.

Eseményről akkor beszélünk, ha a tér valamely pontján, valamely időben történik valami. Ez tehát négy koordináta révén azonosítható. A koordinátákat ismét önkényesen választhatjuk meg: bármely, jól definiált térbeli koordináta és bármely időmérték megteszi. A relativisztikus szemlélet nem különbözteti meg a térbeli és időbeli koordinátákat, mint ahogy két helykoordináta sincs megkülönböztetve. Minden további nélkül választhatunk olyan új koordinátarendszert is, melyben az első térkoordinátát a régi rendszer első és második koordinátájából képeztük. A Föld valamely pontjának helyzetét például megadhatjuk a Piccadillytől északra és nyugatra mérhető távolságával, de ugyanígy a Piccadillytől északkeletre és északnyugatra mérhető távolságával is. Hasonlóképpen, a relativitáselméletben bevezethetünk egy új időkoordinátát, például, az eredeti idő (másodpercben), és a Piccadillytől északra (fénymásodpercben) mért távolságot.

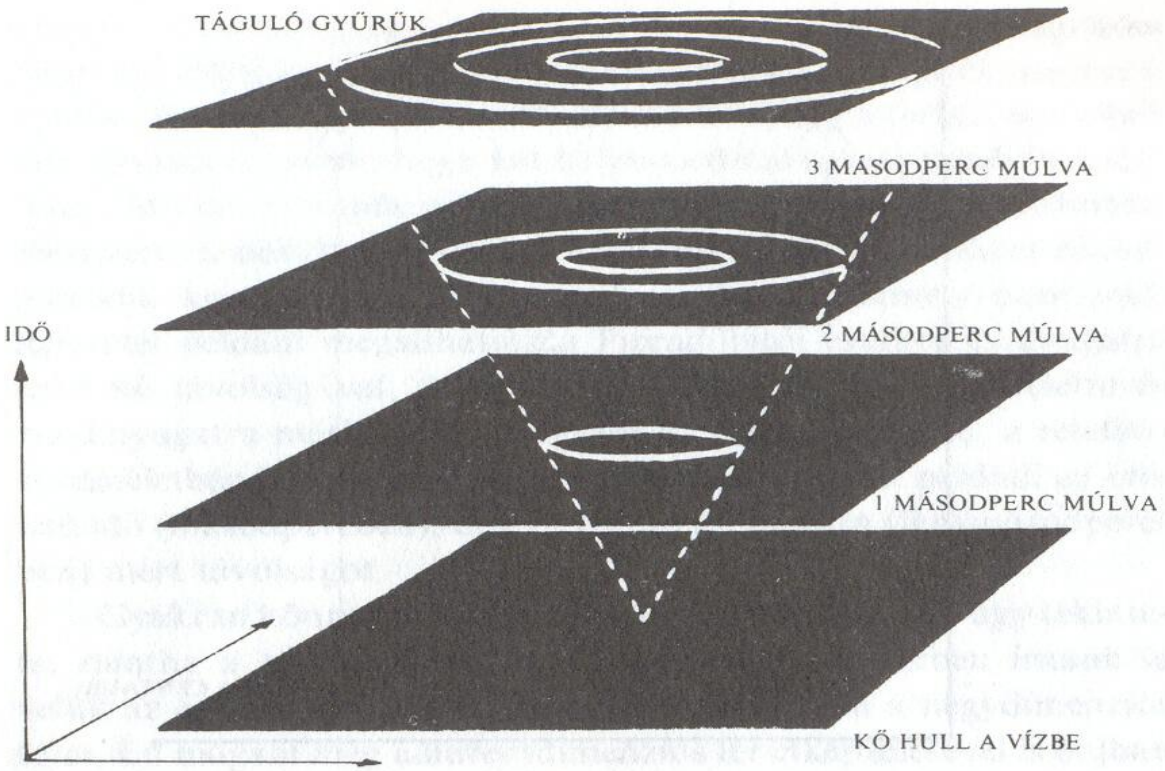
Gyakran könnyebb az esemény négy koordinátáját úgy tekinteni, mintha a téridőnek nevezett, négydimenziós térben írnánk le velük az esemény helyzetét. Nem lehet elképzelni a négydimenziós teret. Én magam még a háromdimenziós tér elképzelésével is bajban vagyok! Kétdimenziós terekről azonban könnyen rajzolhatunk diagramot. Ilyen tér például a Föld felszíne (amely kétdimenziós, mivel bármely pontjának helyzete megadható összesen két adattal: a hosszúsággal és a szélességgel). A továbbiakban könyvünk ábráin fölfelé növekszik az idő, vízszintesen pedig egy térdimenziót tüntetünk fel. A tér másik két dimenzióját figyelmen kívül hagyjuk, vagy esetleg az egyiket perspektivikusan ábrázoljuk. (Ezeket az ábrákat téridő-diagramoknak nevezzük, ilyen volt a 211. ábra is.) A 2.2. ábrán például a függőleges tengelyen az időt tüntettük fel években, a vízszintesen pedig a Nap-Alfa Centauri távolságot, mérföldekben. A Nap és az Alfa Centauri téridőbeli pályáit mutatják az ábra két oldalán a függőleges vonalak. A Napból kilépő fénysugár átlós irányban szeli át az ábrát, és négy év múlva éri el az Alfa Centaurit. Mint láttuk, Maxwell egyenletei megjósolták, hogy a fény sebessége a fényforrás sebességétől független lesz, s ezt pontos mérések megerősítették. Következésképpen, ha a tér valamely pontján egy időpillanatban fényimpulzust bocsátunk ki, akkor a fény az idő előrehaladtával fénygömbként terül szét a térben és ennek a gömbnek a mérete és helyzete független lesz a fényforrás sebességétől. Egymilliomod másodperc elteltével a fény által határolt gömb sugara



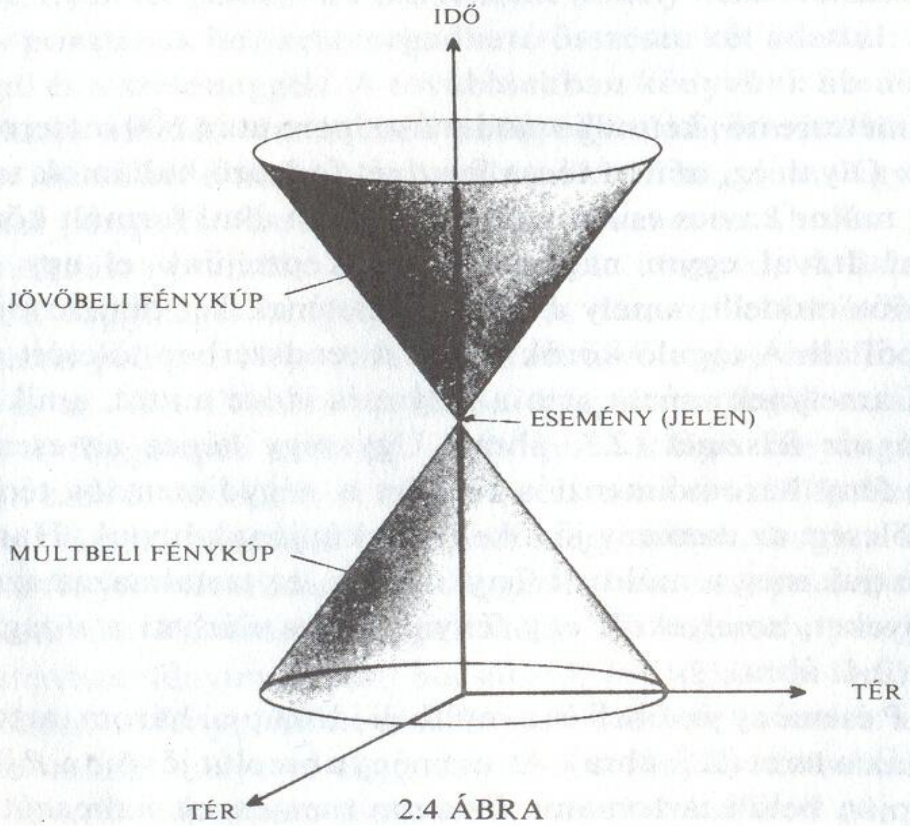
2.2 ÁBRA

300 méterre nő; kétmilliomod másodperc után 600 méterre, és így tovább. Olyan ez, mint a tócsa felszínét fodrozó hullámok tovagyűrűzése, mikor kavics esik a vízbe. A hullám által formált kör az idő előrehaladtával egyre nagyobb lesz. Képzeljünk el egy háromdimenziós modellt, amely a tócsa felületének két dimenziójából és az időből áll. A táguló körök ebben a rendszerben tölcsért alakítanak ki, amelynek csúcsa arra a helyre és időre mutat, amikor a kő elérte a víz felszínét (2.3. ábra). Ugyanígy képez az eseménytől távozó fény háromdimenziós tölcsért a négydimenziós téridőben. Ezt a tölcsért az esemény jövőbeli fénykúpjának hívjuk. Hasonlóan rajzolhatjuk meg a múltbeli fénykúpot is, ez tartalmazza azokat az eseményeket, amelyekről egy fényimpulzus elérheti a vizsgált eseményt (2.4. ábra).

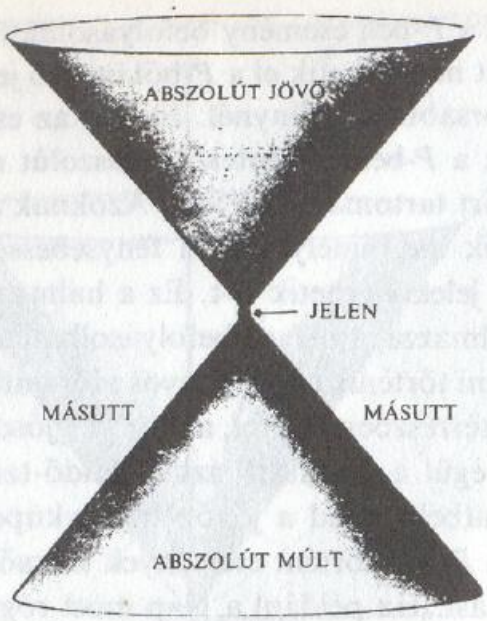
A P esemény jövőbeli és a múltbeli időkúpjai három tartományra osztják a teret (2.5. ábra). Az esemény abszolút jövője a P jövőbeli fénykúpján belüli tartomány. Ez azon események halmazát tartalmazza,



2.3 ÁBRA

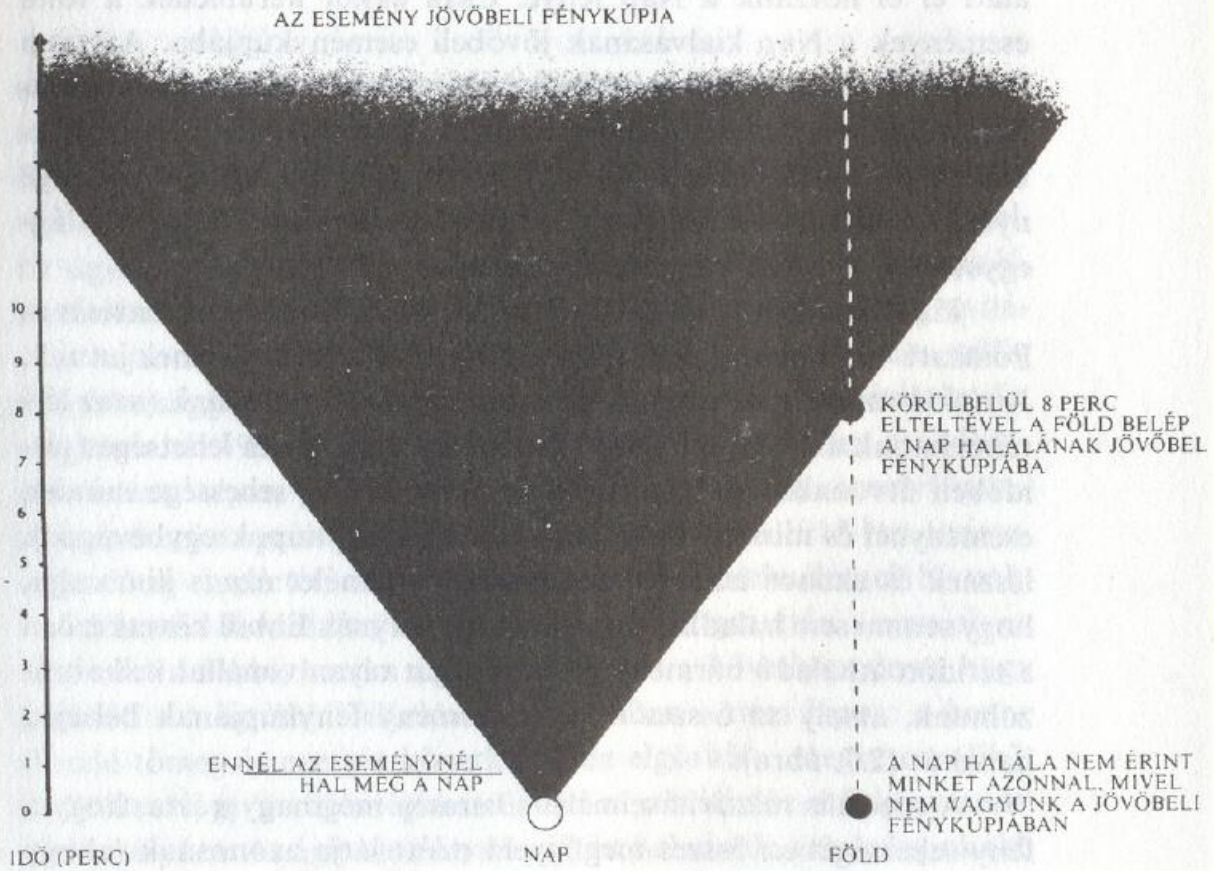


2.4 ÁBRA



2.5 ÁBRA

2.6 ÁBRA



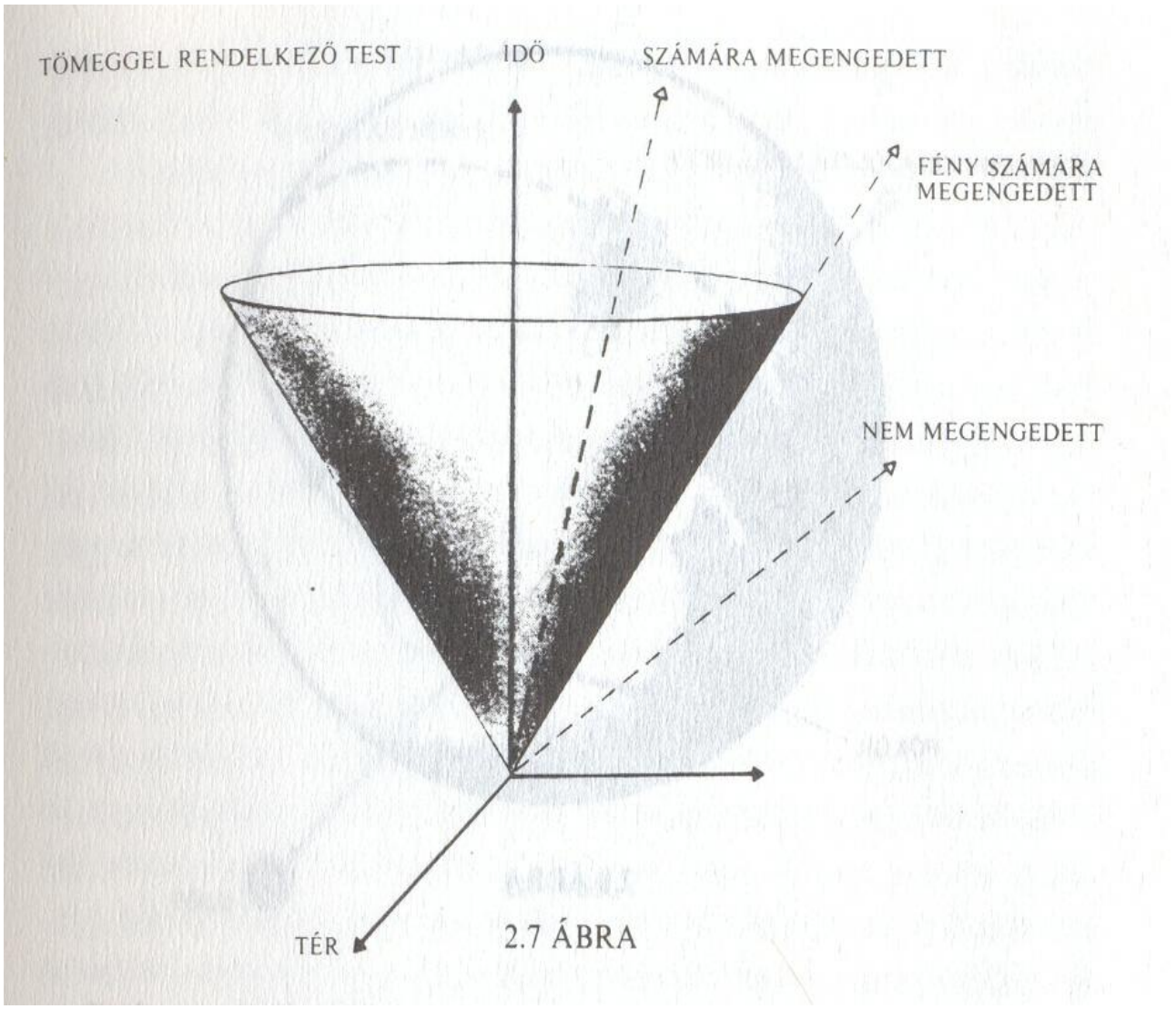
amelyeket a P-beli esemény befolyásolhat. A P fénykúpján kívüli eseményeket nem érhetik el a P-ből induló jelek, mivel semmi sem haladhat gyorsabban a fénynél. Ezeket az eseményeket tehát nem befolyásolják a P-ben történtek. P abszolút múltja a múltbeli fénykúp által bezárt tartományban van. Azoknak az eseményeknek a halmaza tartozik ide, amelyekről a fénysebességgel vagy annál lassabban terjedő jelek elérhetik P-t. Ez a halmaz tehát mindazon eseményeket tartalmazza, amelyek befolyásolhatják a P-ben történteket. Ha tudjuk, mi történik egy bizonyos időpontban, a P

múltbeli fénykúpján belüli térrészben bárhol, akkor megjósolhatjuk, hogy mi történik P-ben. Végül a "másutt" azt a téridő-tartományt jelenti, amely mind a múltbeli, mind a jövőbeli fénykúpon kívül fekszik.

A másutt, illetve a P-ben történt események kölcsönösen nem befolyásolhatják egymást. Ha például a Nap most rögtön kialudna, az nem befolyásolná a pillanatnyi helyzetet a Földön, mivel bolygónk nem az esemény kúpjában, hanem másutt tartózkodik (2.6. ábra). Csak nyolc perc múlva értesülnénk a történtekről, mivel ennyi idő alatt ér el hozzánk a Nap fénye. Csak ekkor kerülnének a földi események a Nap kialvásának jövőbeli eseménykúpjába. Azt sem tudhatjuk tehát, hogy mi történik éppen most a világegyetem távolabbi részeiben: a távoli galaxisok hozzánk elérkező fénye évmilliókkal ezelőtt indult útnak. A legtávolabbi, még látható égitest fénye nyolcmilliárd éves. Amikor az égre nézünk, olyannak látjuk a világegyetemet, amilyen valamikor a múltban volt.

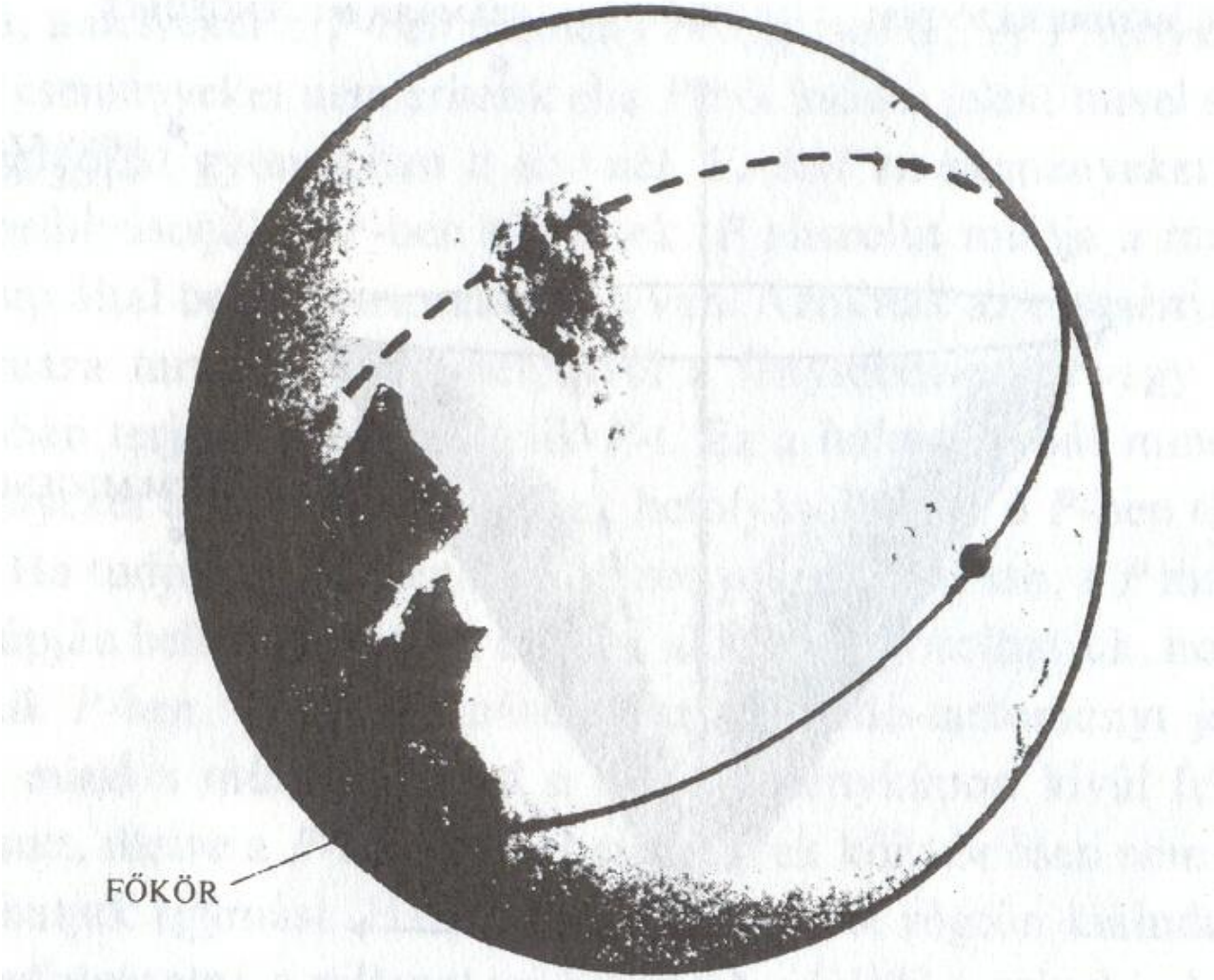
Ha elhanyagoljuk a gravitációs hatásokat - ezt tette Einstein és Poincaré 1905-ben -, akkor a speciális relativitáselmélethez jutunk. A téridő minden eseményhez fénykúpot szerkeszthetünk (azaz létrehozhatjuk az esemény által kibocsátott fény összes lehetséges téridőbeli útvonalainak halmazát), és mivel a fény sebessége minden eseménynél és minden irányban azonos, a fénykúpok egybevágóak lesznek és azonos irányba mutatnak. Az elmélet azt is kimondja, hogy semmi sem haladhat gyorsabban a fénynél. Ebből következően a téridőn áthaladó bármely tárgy pályáját olyan vonallal kell ábrázolnunk, amely az összes érintett esemény fénykúpjának belsején halad át (2.7. ábra).

A speciális relativitáselmélet sikeresen megmagyarázta, hogy a fény sebességét az összes megfigyelő miért látja azonosnak (ahogy



2.7 ÁBRA

a Michelson-Morley kísérletből is kitűnt). Jól leírta továbbá, hogy mi történik a fénysebességhez közeli sebességgel haladó tárgyakkal. Ellentmondott viszont a newtoni gravitációs elméletnek, amely szerint a tárgyak közötti tömegvonzás függ a köztük levő távolságtól. Ez ugyanis azt jelenti, hogy ha az egyik tárgy elmozdul a helyéről, a másikra ható erő azonnal megváltozik. Más szavakkal: a gravitációs hatásoknak végtelen sebességgel kell terjedniük, nem pedig fénysebességgel vagy lassabban, ahogy a speciális relativitáselmélet megkívánná. 1908 és 1914 között Einstein több sikertelen próbálkozást is tett olyan gravitációs elmélet kidolgozására, amely összeegyeztethető a speciális relativitáselmélettel. Végül 1915-ben terjesztette elő új elméletét, melyet általános relativitáselméletnek hívunk. Einstein forradalmi elképzelése szerint a gravitáció nem olyan erő, mint a többi, hanem annak a ténynek a következménye, hogy a téridő - a korábbi feltevésekkel szemben - nem lapos: a benne eloszló tömeg és energia következtében elgörbül, "megvetemedik". A Földet vagy a többi égitestet nem a gravitációs erő kényszeríti görbe pályára. Az égitestek olyan pályán haladnak, amely leginkább

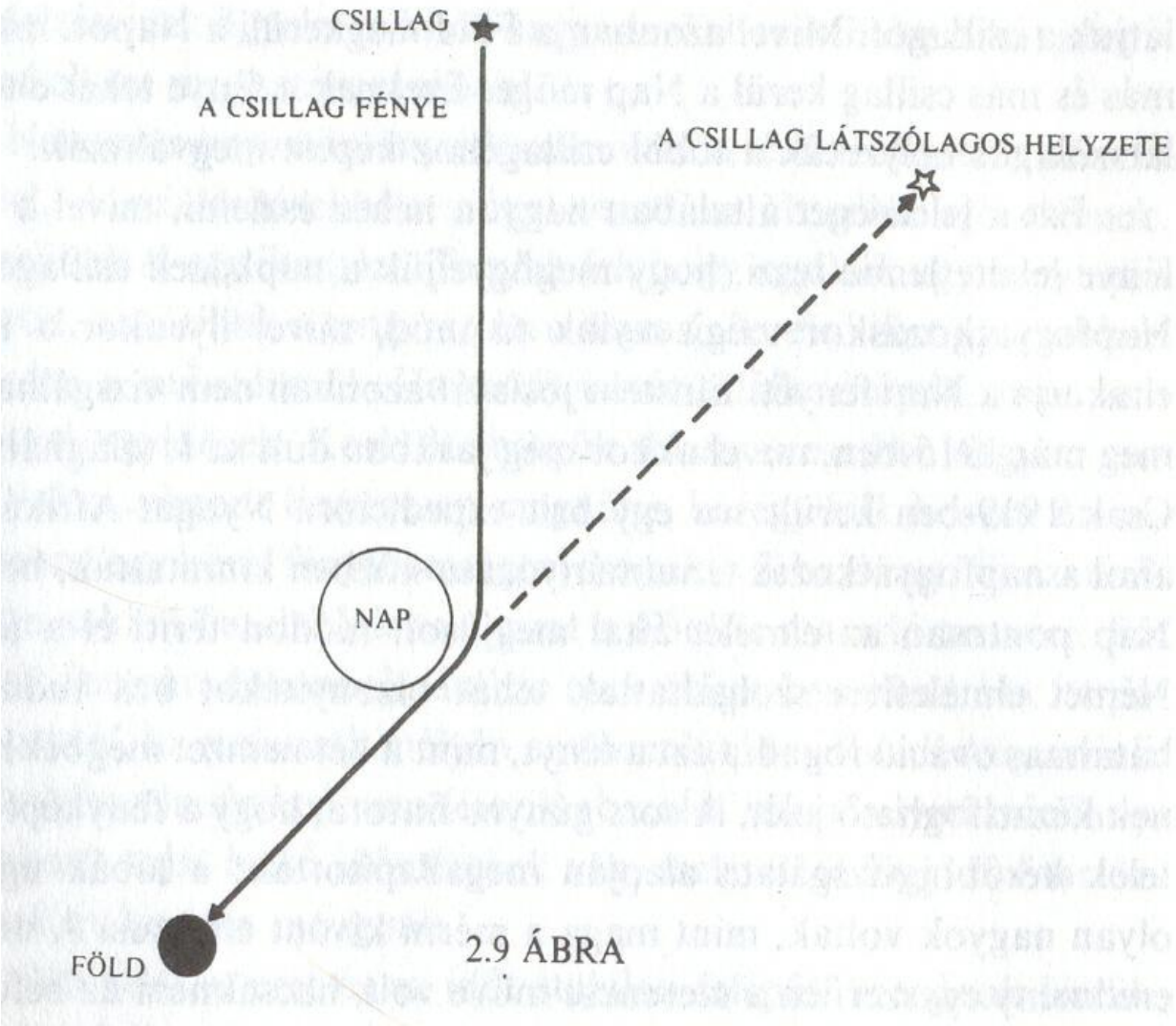


2.8 ÁBRA

a görbült térben leírt egyenesnek felel meg. E pályát geodetikus vonalnak nevezik; két közeli pont között ez a legrövidebb (és a leghosszabb) út. A Föld felülete például nem más, mint egy kétdimenziós görbült tér. A földi geodetikus vonalat más néven főkörnek hívjuk, két pont között ez adja a legrövidebb távolságot (2.8. ábra). Két repülőtér között a geodetikus vonal a legrövidebb út,

ezért a repülésirányító ezen vezeti végig a pilótát. Az általános relativitáselméletben a testek mindig egyenes vonalak mentén haladnak a négydimenziós téridőben, mozgásuk azonban görbült pályaként jelentkezik a mi háromdimenziós terünkben. (Olyan ez, mintha dombos terep fölött haladó repülőgépet figyelnénk. A gép egyenes vonalat követ a háromdimenziós térben, árnyéka viszont görbe pályát ír le a kétdimenziós felületen.)

A Nap tömege oly módon görbíti meg a téridőt, hogy noha a Föld a négydimenziós téridőben egyenes pályán halad, számunkra úgy tűnik, mintha háromdimenziós körpályát követne. Sőt mi több, az általános relativitáselmélet által megjósolt bolygópályák csaknem teljesen egybeesnek a Newton gravitációs elméletéből számítottakkal. A Merkúr kering a legközelebb a Naphoz és ezért a legerősebb



2.9 ÁBRA

gravitációs hatás őt éri. Pályája meglehetősen elnyújtott; az általános relativitáselmélet azt jósolta, hogy az ellipszis hossztengelye tízezer évenként körülbelül egy fokkal elfordul. Bármilyen csekély is ez az effektus, már 1915 előtt sikerült megmérni; ezt tekintették az Einstein-elmélet egyik első bizonyítékának. A közelmúltban radar segítségével megmérték a többi bolygó pályájának még csekélyebb eltérését is a newtoni jóslatoktól, és teljesen egyeztek az általános relativitáselmélet előrejelzéseivel.

A fénysugarak is a téridő geodetikus vonalait követik. Természetesen esetükben is azt jelenti a téridő görbült volta, hogy térbeli pályájuk nem egyenes. Az általános relativitáselmélet tehát azt jósolja, hogy gravitációs erőterek eltérítik a fénysugarakat. Így például az elmélet értelmében a Naphoz közeli pontok fénykúpjai a Nap tömegének hatására enyhén befelé hajlanak. Ennek következtében egy távoli csillag fénye - ha történetesen a Nap közelében halad el - csekély eltérítést

szenved, s emiatt a földi megfigyelő számára e csillag látszólagos helyzete megváltozik (2.9. ábra). Ha a csillag fénye mindig a Nap közelében haladna el, akkor természetesen nem állapíthatnánk meg, hogy eltérült-e a fénye, vagy a valódi helyén látjuk a csillagot. Mivel azonban a Föld megkerüli a Napot, mindig más és más csillag kerül a Nap mögé. Ezeknek a fénye tehát eltérül, látszólagos helyzetük a többi csillagéhoz képest megváltozik. Ezt a jelenséget általában nagyon nehéz észlelni, mivel a Nap fénye lehetetlenné teszi, hogy megfigyeljük a napközeli csillagokat. Napfogyatkozáskor mégis nyílik rá mód, mivel ilyenkor a Hold eltakarja a Nap fényét. Einstein jóslatát azonban nem vizsgálhatták meg már 1915-ben, mivel akkor még javában dúlt az 1. világháború. Csak 1919-ben került sor egy brit expedícióra Nyugat-Afrikában, ahol a napfogyatkozás tanulmányozása közben kimutatták, hogy a Nap pontosan az elmélet által megjósolt módon téríti el a fényt. Német elmélethez szolgáltattak tehát bizonyítékot brit tudósok; hatalmas ováció fogadta ezt a tényt, mint a két nemzet megbékélésének kézzelfogható jelét. A sors gúnyos fintora, hogy a fényképfelvételek későbbi vizsgálata alapján megállapították: a hibák ugyanolyan nagyok voltak, mint maga a mérni kívánt effektus. A mérési eredmény egyszerűen a szerencse műve volt, hacsak nem az befolyásolta a tudósokat, hogy tudták, milyen eredményt szeretnének kapni (az ilyesmi nem is olyan ritka a tudományban). Mindenesetre, a fényeltérítés hipotézisét későbbi mérések akkurátusan alátámasztották.

Az általános relativitáselmélet másik előrejelzése szerint az idő látszólag lassabban telik egy olyan hatalmas tömeg közelében, mint a Föld. Összefüggés létezik ugyanis a fény energiája és frekvenciája (a fény hullámainak száma másodpercenként) között: minél nagyobb a sugár energiája, annál nagyobb a frekvenciája. Ahogy tehát a fény fölfelé tör a. Föld gravitációs terében, energiát veszít, azaz frekvenciája csökken. (Ez annyit jelent, hogy megnő az egymást követő két hullámhegy megjelenése közötti idő.) Ha valaki a magasból tekint alá, úgy érzi, idelenn minden lassabban halad. Ezt az állítást 1962-ben kísérletileg ellenőrizték: két nagyon pontos órát helyeztek el egy víztorony alján és tetején. Az általános relativitáselmélettel teljes összhangban, a Földhöz közelebbi, alsó óra lassabban járt. A különböző föld feletti magasságban működő órák eltérő sebessége immár nagy jelentőségre tett szert, mivel mindinkább terjed a műholdakról sugárzott jelekre alapozó, nagypontosságú navigációs rendszerek használata. Az általános relativitáselmélet előrejelzéseinek figyelmen kívül hagyása több mérföldes hibát jelenthet a helyzet meghatározásában!

Newton mozgástörvényei leszámoltak a térbeli abszolút pozíció elvével. A relativitáselmélet véget vetett az abszolút idő elvének. Képzeljünk el egy ikerpárt. Tegyük fel, hogy egyikük egy hegytetőn éli életét, a másikuk a tengerszinten marad. Az első iker gyorsabban öregedne a másodiknál. Ha tehát ismét találkoznának, már nem volnának egyidősek. Korkülönbségük ebben az esetben nagyon csekély volna, viszont lényegesen megnőne, ha egyikük hosszú űrutazást tenne egy közel fénysebességgel száguldó űrhajóban. Visszatérése után sokkal fiatalabb lenne, mint a Földön maradó testvére. Ezt nevezik ikerparadoxonnak, ámbár csak akkor beszélhetnénk itt paradoxonról, ha tudatunk mélyén az abszolút idő elvét dédelgetnénk. A relativitáselméletben nem létezik abszolút idő; ehelyett mindannyiunknak saját belső időmércénk van, mely attól függ, hol tartózkodunk és hogyan mozgunk.

1915 előtt a teret és az időt stabilan felépült arénának hittük, amelyben lejátszódhatnak az események, de amelyet nem befolyásolnak a benne történtek. Igaz volt ez még a speciális relativitáselméletre is. Testek mozogtak, erők vonzottak és taszítottak, az idő és tér azonban közömbösen, változatlanul hömpölygött tova. Természetesnek számított a föltételezés, hogy az idő és tér a végtelenbe tart. Merőben más a helyzet az általános relativitáselmélet szerint. A tér és idő dinamikus mennyiségekké váltak: egy test elmozdulása, egy erő hatása megváltoztatja a tér és idő görbületét - és megfordítva, téridő szerkezete befolyásolja a testek mozgását és az erők hatását. A tér és idő nem csupán befolyásolja az eseményeket: őket is befolyásolja minden, ami a világegyetemben történik. Ahogy nem beszélhetünk a világegyetem eseményeiről a térre és időre utalás nélkül, ugyanúgy értelmetlen volna az általános relativitáselmélet szerint, ha térről és időről beszélnénk a világegyetem határain kívül.

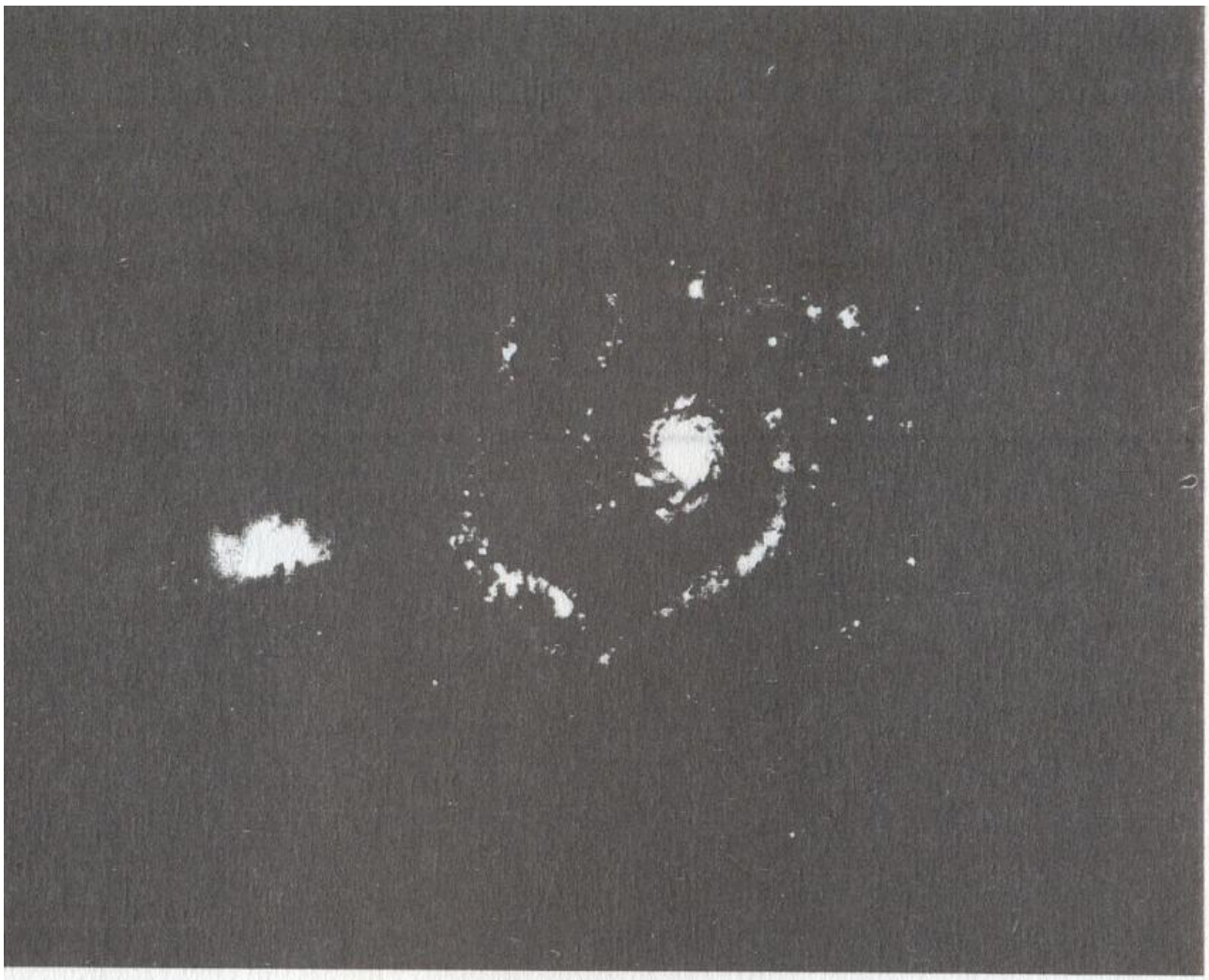
A térről és időről szerzett új ismereteink a felfedezést követő évtizedekben alapvetően átalakították

a világegyetemről alkotott képünket. A lényegében változatlan, öröktől fogva létező, örökké fennmaradó világmindenség régi elképelését felváltotta a dinamikus, táguló univerzum képe. Ez az univerzum a jelek szerint véges hosszú idővel ezelőtt keletkezett, és a véges távoli jövőben el is pusztulhat. Következő fejezetünkben ezzel a gondolati forradalommal foglalkozunk. Hosszú évek múltán egyébként ez volt az elméleti fizikában folytatott munkám kiindulópontja. Robert Penrose-zal kimutattuk, hogy Einstein általános relativitáselmélete értelmében a világegyetemnek feltétlenül volt kezdete, és valószínűleg vége is lesz.

3

A TÁGULÓ VILÁGEGYETEM

Ha tiszta, holdtalan éjszakán az égboltra pillantunk, valószínűleg a Vénuszt, Marsot, Jupitert, Szaturnuszt látjuk a legfényesebbnek. Találunk rengeteg csillagot is, amelyek mind ugyanolyan napok, mint a mienk, csak sokkal messzebb vannak. Ezek közül az állócsillagok közül néhányan, ha kis mértékben is, érzékelhetően megváltoztatják a helyzetüket egymáshoz képest, mialatt a Föld megkerüli a Napot: egyáltalán nem állócsillagok! Ennek az az oka, hogy az ilyen csillagok viszonylag közel vannak hozzánk. Ahogyan a Föld a Nap körül kering, más nézőpontból látjuk őket a még távolabbi csillagok háttere előtt. Ez már csak azért is szerencsés, mert így mérhetjük meg közvetlenül távolságukat a Földtől: minél közelebb vannak, annál nagyobb a látszólagos elmozdulásuk. A legközelebbi csillag, az Alfa Centauri a mérések szerint mintegy négy fényévnyire van tőlünk (négy év alatt ér onnan ide a fény), ami körülbelül 37 millió kilométert tesz ki. A szabad szemmel látható csillagok többsége néhány száz fényéven belül helyezkedik el. Összehasonlításként: a mi Napunk mindössze nyolc fénypercre van tőlünk! Éjszakai égboltunkon mindenhová jut a látható csillagokból, különösen sok gyűlik azonban össze belőlük egy sávban, melyet Tejútnak hívunk.



3.1 ÁBRA

Már l 750-ben is akadt csillagász, aki úgy vélte: a Tejút megjelenése magyarázható lenne, ha a látható csillagok többsége korongszerű alakzatban csoportosulna. Ilyen alakzat például az is, amit ma spirálgalaxisnak nevezünk. Alig néhány évtizeddel később ez a csillagász, Sir William Herschel be is bizonyította elképzelését: aprólékos munkával nagyszámú csillag helyzetét és távolságát katalogizálta. Még így is csak e század elején fogadták el elképzelését maradéktalanul.

A világegyetemről alkotott mai felfogásunk mindössze 1924-ig nyúlik vissza. Ekkor mutatta ki az amerikai Edwin Hubble, hogy nem a mienk az egyetlen galaxis. Számos hasonló található az űrben, és óriási, üres térrészek választják el őket egymástól. Ennek igazolásához meg kellett határoznia e távoli galaxisok távolságát, márpedig ezek olyan messzire vannak, hogy tényleg mozdulatlannak látszanak. Hubble tehát közvetett módszerek használatára kényszerült. Egy csillag látszólagos fényessége két tényezőtől függ: a kisugárzott fény mennyiségétől (az abszolút fényességtől), és a tőlünk mért távolságától. Közeli csillagok esetében mind a látszólagos fényesség, mind a távolság megmérhető, és ezekből az adatokból kiszámíthatjuk abszolút fényességüket. Fordítva: ha ismernénk más galaxisok csillagainak abszolút fényességét, akkor látszólagos fényességük megmérése után kiszámíthatnánk távolságukat. Hubble felfigyelt rá, hogy bizonyos fajta csillagok abszolút fényessége - mikor elég közel vannak hozzánk, hogy elvégezhessük a mérést - mindig ugyanaz. Ha tehát ugyanilyen csillagokra bukkanunk a távoli galaxisokban, feltételezhetjük, hogy ezek abszolút fényessége is ugyanakkora lesz, s így kiszámíthatjuk a távolságukat. Ha pedig ez a számítás egy galaxis több csillagára is azonos eredményt ad, akkor eléggé bizonyosak lehetünk eredményünk helyességében.

Edwin Hubble kilenc galaxis távolságát számította ki ezzel a módszerrel. Ma már tudjuk, hogy Tejútrendszerünk csupán egy a modern teleszkópokkal észlelhető néhány százmilliárd galaxis közt, és e galaxisok mindegyike néhány százmilliárd csillagot tartalmaz. A 3.1. ábrán olyan spirálgalaxis látható, amilyennek feltételezéseink szerint a mienk látszik egy távoli galaxisban élő megfigyelő szemében. Lassan forgó galaxisunk szélessége körülbelül százezer fényév; a spirálkarokban elhelyezkedő csillagok néhány százmilliárd évenként egyszer kerülik meg a galaxis középpontját. Napunk teljesen közönséges, átlagos méretű sárga csillag, az egyik spirálkar belső szélének közelében. Hosszú utat tettünk meg Arisztotelész és Ptolemaiosz óta, amikor még a Földet gondoltuk a világegyetem központjának!

A csillagok olyan messze vannak, hogy csupán fénylő pontoknak látszanak. Sem alakjukat, sem méretüket nem láthatjuk. Hogy különböztethetjük meg tehát típusaikat? A csillagok elsöprő többségének esetében egyetlen jellegzetes vonást figyelhetünk csak meg: a fényük színét. Newton fedezte fel, hogy ha a Nap fénye háromszög alakú üveghasábon - prizmán - halad át, akkor alapvető összetevő színeire (színspektrumra) bomlik, olyanra, mint a szivárvány. Ha távcsövünket magányos csillagra vagy galaxisra fókuszáljuk, hasonló módon megfigyelhetjük az onnan érkező fény spektrumát.

A különböző csillagok spektruma eltér, a színek egymáshoz viszonyított erőssége azonban mindig olyan, amilyent vörösen izzó test által kibocsátott fény esetében várna az ember. (Ami azt illeti, bármely átlátszatlan, vörösen izzó tárgy fényének spektruma csak a tárgy hőmérsékletétől függ; így is nevezzük: hőszínképnek. Ebből következik, hogy a spektrum felvételével meg tudjuk állapítani a csillag hőmérsékletét.) Sőt, bizonyos színek hiányára is felfigyelhetünk a csillagok spektrumában, s a hiánylista csillagról csillagra változik. Mivel minden kémiai elem a rá jellemző, sajátos színsorozatot nyeli el, a csillag spektrumából hiányzó színek listáját e sorozatokkal egybevetve pontosan megmondhatjuk, milyen elemek vannak jelen a csillag légkörében.

Amikor a csillagászok az 1920-as években először kezdték vizsgálni a többi galaxis spektrumát, rendkívül furcsa jelenségre bukkantak: ugyanolyan hiánylistákat találtak, mint a mi galaxisunk csillagainál, de valamennyi szín azonos arányban eltolódott a színkép vörös vége felé. Ennek a jelentőségét akkor értjük meg igazán, ha megismerkedünk a Doppler-jelenséggel. Mint láttuk, a fény az elektromágneses tér fluktuációiból, hullámzásaiból áll. Frekvenciája (azaz a hullámok másodpercenkénti száma) roppant nagy, a látható tartományban másodpercenként négyszáz millió millió és hétszáz millió millió közötti. Szemünk a különböző frekvenciákat különböző színekkel érzékeli; a legalacsonyabbak a spektrum vörös végén jelentkeznek, a legmagasabbak pedig a kék végén. Mármost képzeljünk el egy állandó távolságú fényforrást, például egy csillagot, mely állandó frekvenciájú fényt bocsát ki. Nyilvánvaló, hogy a kibocsátott és az általunk észlelt fény frekvenciája azonos lesz (a galaxis gravitációs tere nem elég nagy ahhoz, hogy számottevő hatása legyen). Tegyük fel, hogy a csillag közeledik felénk. A következő hullám hegy kibocsátásakor közelebb lesz hozzánk a fényforrás, így a hullámhegy rövidebb idő alatt ér hozzánk, mintha a csillag mozdulatlan maradt volna. A két hullámhegy megérkezése közötti idő csökken, tehát másodpercenként több hullám érkezik hozzánk (azaz nagyobb a frekvencia), mint amikor a csillag mozdulatlan volt. Ugyanígy, ha a fényforrás távolodik tőlünk, a hullámok frekvenciája csökken. A fény esetében ez azt jelenti, hogy a tőlünk távolodó csillagok spektruma eltolódik a spektrum vörös tartománya felé (ezt nevezik vöröseltolódásnak), míg a hozzánk közeledőké a kék tartomány felé csúszik. A frekvencia és a sebesség közti összefüggés, melyet Doppler-jelenségnek hívnak, mindennapi tapasztalataink közt is szerepel. Hallgassuk csak meg az úton végigszaladó autó zaját: amíg közeledik, a motor hangja egyre emelkedik (nő a hang frekvenciája), amikor pedig elhalad előttünk és távolodni kezd, mind mélyebben szól. A fény- és rádióhullámok ugyanígy viselkednek. A rendőrség például a Doppler-jelenség segítségével méri az autók sebességét: meghatározzák a róluk visszaverődő rádióhullámok frekvenciáját.

Miután Hubble bebizonyította, hogy más galaxisok is léteznek, nekilátott, hogy összeállítsa katalógusukat és meghatározza spektrumukat. Akkoriban legtöbben arra számítottak, hogy a galaxisok véletlenszerű összevisszaságban mozognak körülöttünk, s ezért úgy vélték, hogy

ugyanannyi kékeltolódásos spektrumot találnak, mint vöröseltolódásost. Óriási meglepetés érte hát őket, amikor szinte mindegyik galaxis esetében vöröseltolódást találtak: csaknem minden galaxis távolodik tőlünk! Ennél is meglepőbb volt Hubble 1929ben publikált fölfedezése: még a vöröseltolódások mértéke sem véletlenszerű, hanem egyenesen arányos a galaxis távolságával. Minél messzebb van tehát egy galaxis, annál gyorsabban távolodik tőlünk! Szó sincs tehát arról, hogy a világegyetem statikus volna, ahogy azt mindenki hitte korábban; éppen ellenkezőleg, rohamosan tágul: a galaxisok közti távolság állandóan nő.

A világegyetem tágulásának felfedezése egyike volt a huszadik század nagy intellektuális forradalmainak. Mai ésszel visszatekintve persze elcsodálkozhatunk azon, hogy miért nem gondolt erre senki korábban. Newton is, mások is rájöhettek volna, hogy egy statikus világmindenség egykettőre zsugorodni kezdene a gravitáció hatására. Tételezzük fel ezzel szemben, hogy a világegyetem tágul. Ha elég lassan tágul, a gravitáció előbb-utóbb megállítja és összehúzódásra kényszeríti. Ha viszont valamely kritikus sebességnél gyorsabban tágul, a gravitáció sose lesz elég erős hozzá, hogy megállítsa, és a világegyetem mindörökké tágulni fog.

Olyan ez, mint a rakétakilövés a Földről. Viszonylag lassú sebességnél a gravitáció előbb-utóbb megállítja a rakétát, mely szépen visszaesik a Földre. A kritikus értéket (másodpercenként körülbelül tizenkét kilométert) meghaladó sebesség esetén viszont a gravitáció nem tudja visszahúzni a rakétát, az tehát mindörökre elhagyja a Földet. A világegyetem ilyetén viselkedését Newton gravitációs törvénye alapján bármikor megjósolhatták volna a tizenkilencedik vagy a tizennyolcadik században, sőt a tizenhetedik század vége felé is. Olyan erős hittel csüngött azonban mindenki a statikus világmindenség elképzelésén, hogy egészen a huszadik század elejéig tartotta magát ez a világkép. Maga Einstein is olyannyira bizonyos volt a világegyetem statikus voltában, hogy 19 I 5-ben, az általános relativitáselmélet megfogalmazásakor egy úgynevezett kozmológiai faktor beiktatásával módosította az egyenleteit. Bevezetett egy új erőt, az "antigravitációt", mely a többi erővel ellentétben nem valamely forrásból eredt, hanem a téridő szövedékébe épült be. Kijelentette, hogy a téridő eredendő sajátsága a tágulási hajlam, melynek értéke pontosan kiegyensúlyozhatja a viiágmindenségben található anyag eredő tömegvonzását, minek következtében a világegyetem maga statikus marad. Talán csak egyetlen férfiú volt hajlandó "névértékben" elfogadni az általános relativitáselmélet minden következményét, s míg Einstein és a többi fizikus kibúvókat kerestek az általános relativitáselméletnek a nem-statikus világegyetemre vonatkozó jóslata alól, Alexander Friedmann orosz fizikus hozzálátott, hogy megvizsgálja ezt a lehetőséget.

Friedmann két roppant egyszerű feltételezéssel élt a világmindenségről: egyrészt, hogy minden irányban egyformának látjuk; másrészt, hogy ugyanez lenne a helyzet, ha bárhonnan máshonnan figyelnénk meg az univerzumot. Mindössze e két feltevés alapján Friedmann bebizonyította, hogy a világmindenség nem lehet statikus. Friedmann tehát már 1922-ben, évekkel Hubble előtt pontosan megjósolta az amerikai csillagász felfedezését!

A valóságban nyilvánvalóan nem igaz az a feltevés, hogy a világegyetem minden irányban ugyanúgy néz ki. Láttuk például, hogy galaxisunk többi csillaga az éjszakai égbolton keresztülhúzódó, jól elkülönült fénysávba tömörül - ez a Tejút. Ha azonban a távoli galaxisokra tekintünk, mindenütt többé-kevésbé ugyanannyit találunk belőlük. A világmindenség tehát nagyjából egyformának látszik minden irányban, feltéve, hogy a vizsgálat léptéke elég nagy a galaxisok közti távolsághoz képest, s hogy elhanyagoljuk a kisebb léptéknél mutatkozó különbségeket. Hosszú ideig mindez kellőképpen alátámasztotta Friedmann feltételezését, melyet a valódi világegyetem durva közelítésének tekintettek. A közelmúltban azonban egy szerencsés véletlen kapcsán bebizonyosodott, hogy ez a feltételezés valóban figyelemre méltó pontossággal írja le világegyetemünket.

1965-ben a Bell Telephone Laboratories-nél, New Jersey-ben két amerikai fizikus kísérletezett egy rendkívül érzékeny mikrohullámú érzékelővel. (A mikrohullám ugyanolyan, mint a fényhullám, csak a frekvenciája kisebb: másodpercenként mindössze néhány tízmilliárd hullám.) Amo Penzias

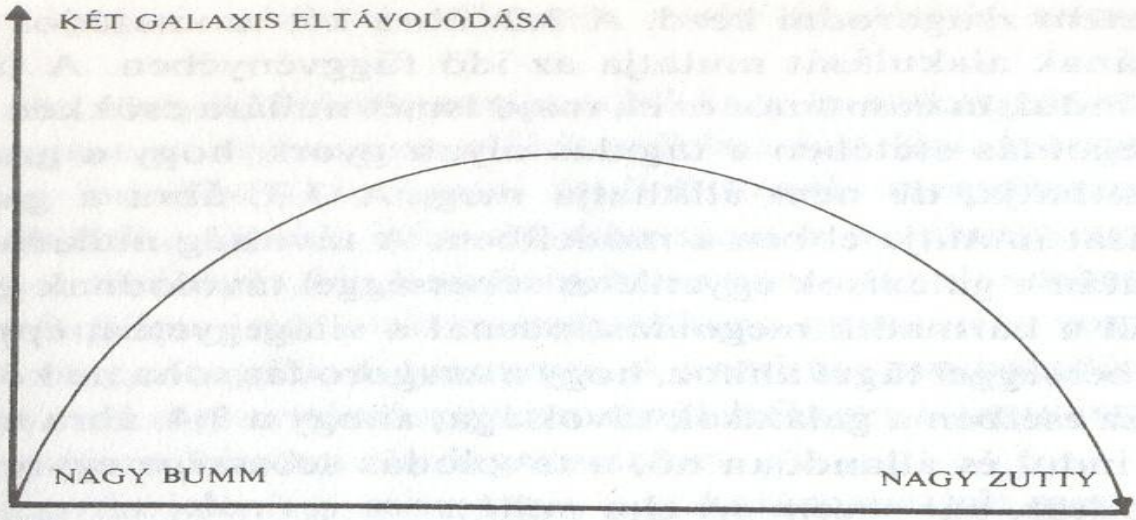
és Robert Wilson, a két kutató, aggódva észlelték, hogy detektoruk a kelleténél több zajt vesz fel. A zajnak nem volt semmiféle határozott iránya. A kutatók először madárürüléket találtak a detektorukban, úgyhogy további hibákra gyanakodtak, de hamarosan kizárták ezek lehetőségét. Tudták, hogy bármiféle légköri eredetű zajnak fel kell erősödnie, ha a detektor nem pont fölfelé mutat, mivel a fénysugarak sokkal vastagabb levegőrétegen utaznak át, ha a horizont felől kell érkezniük, mintha egyenesen föntről fogadnánk őket. Akármerre forgatták detektorukat, a zaj ugyanakkora maradt, nyilvánvaló tehát, hogy a légkörön kívülről kellett érkeznie. Nagysága éjjel-nappal állandó volt, és az maradt egész évben, holott a Föld közben elfordult a tengelye körül is, és Nap körüli pályáján is haladt. Ez arra utalt, hogy a zaj forrása a Naprendszeren, sőt: a galaxison is kívül van, különben az erőssége változna, ahogy a Föld forgása következtében a detektor más és más irányba mutat. Tudjuk, hogy a New Jersey-ben felfogott sugárzás valójában a megfigyelhető univerzum nagy részén keresztülutazott, s mivel minden irányból ugyanolyan, a világmindenségnek - egész nagy léptékű skálán - mindenütt egyformának kell lennie. Ma már tudjuk, hogy bármerre tekintünk, a zaj szintje sose változik egy tízezred résznél jobban. Penzias és Wilson tehát Friedmann első feltételezésének meglepően pontos bizonyítékába botlott.

Nagyjából ez idő tájt két másik amerikai fizikus is a mikrohullámok iránt kezdett érdeklődni. Bob Dicke és Jim Peebles Penziasék közelében, a Princeton Egyetemen dolgoztak. George Gamow (Alexander Friedmann egykori tanítványa) feltevését boncolgatták, mely szerint a korai univerzum forró volt, nagy sűrűségű, és fehéren izzott. Dickie és Peebles úgy érveltek, hogy még ma is látnunk kellene a hajdani izzást, mivel a világegyetem legtávolabbi részeinek sugárzása csak most ér el hozzánk. A világegyetem tágulása következtében azonban ez a sugárzás akkora vöröseltolódást szenved, hogy számunkra mikrohullámú sugárzás ként kell jelentkeznie.

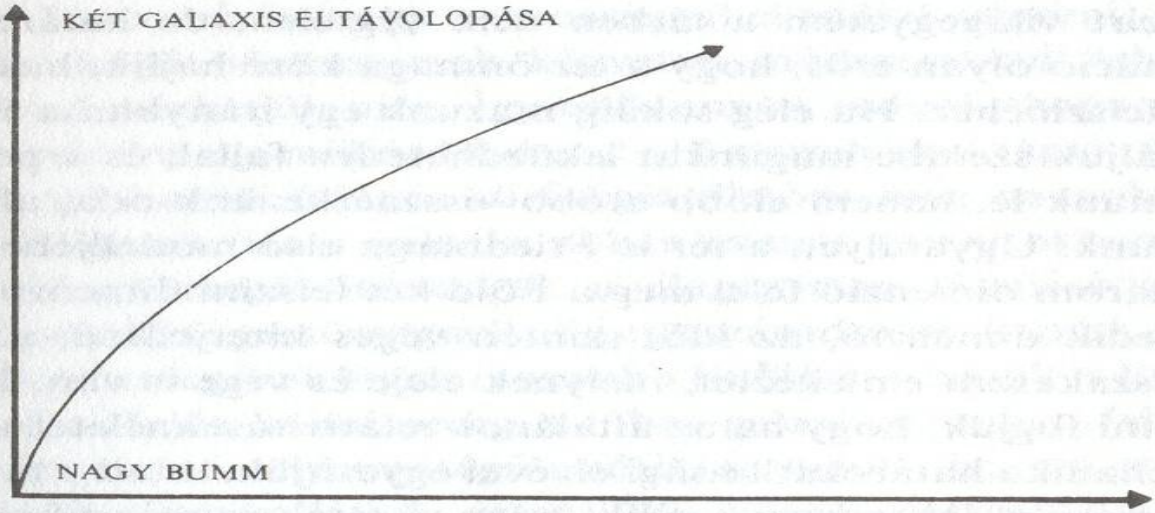
A Dicke-Peebles páros éppen arra készült, hogy megkeresse ezt a sugárzást, amikor Penzias és Wilson értesültek munkájukról, és rájöttek, hogy ők már meg is találták. Penzias és Wilson ezért megkapták az 1978. évi Nobel-díjat (ami elég igazságtalannak tűnik Dicke-vel és Peeblesszel szemben, nem is szólva Gamowról!).

Bebizonyosodott tehát, hogy bármerre nézünk is, ugyanolyannak látjuk a világegyetemet. Első pillantásra ez arra utalhat, hogy valamilyen különleges helyen vagyunk az univerzumban. Pontosabban, ha úgy találjuk, hogy az összes galaxis éppen tőlünk távolodik, akkor mi magunk nyilván a világmindenség közepén vagyunk. Más megoldás is kínálkozik azonban: hogy tudniillik a világegyetem bármely másik galaxisról nézve is ugyanilyennek mutatkozik. Mint láttuk, ez Friedmann második feltételezése. Tudományos tapasztalatainkkal sem bizonyítani, sem cáfolni nem tudjuk ezt a feltételezést. Illő szerénységből fogadjuk el: fölöttébb különös volna, ha éppen mi körülöttünk egyformának látszana a világmindenség, de más pontok körül már nem. Friedmann modelljében minden galaxis távolodik az összes többitől. Olyan ez, mintha egy pöttyösre festett léggömböt felfújunk. Ahogy egyre nagyobbra nő a léggömb, bármelyik két pont távolsága nő, de egyik pontot se tekinthetjük a tágulás középpontjának. Sőt: minél messzebb kerülnek a pontok, annál gyorsabban távolodnak egymástól. Ugyanez a helyzet Friedmann modelljében is: bármely két galaxis távolodásának sebessége egyenesen arányos a távolságukkal. Ez a modell tehát azt jósolja, hogy egy galaxis vöröseltolódása egyenesen arányos lesz tőlünk mért távolságával, pontosan úgy, ahogy Hubble találta. A modell nyilvánvaló sikere és Hubble adatainak előrejelzése ellenére Friedmann munkája jobbára ismeretlen maradt a Nyugat számára, amíg Howard Robertson amerikai fizikus és Arthur Walker brit matematikus 1935- ben hasonló modellekkel nem állt elő, hogy értelmezzék Hubble felfedezését a világegyetem tágulásáról.

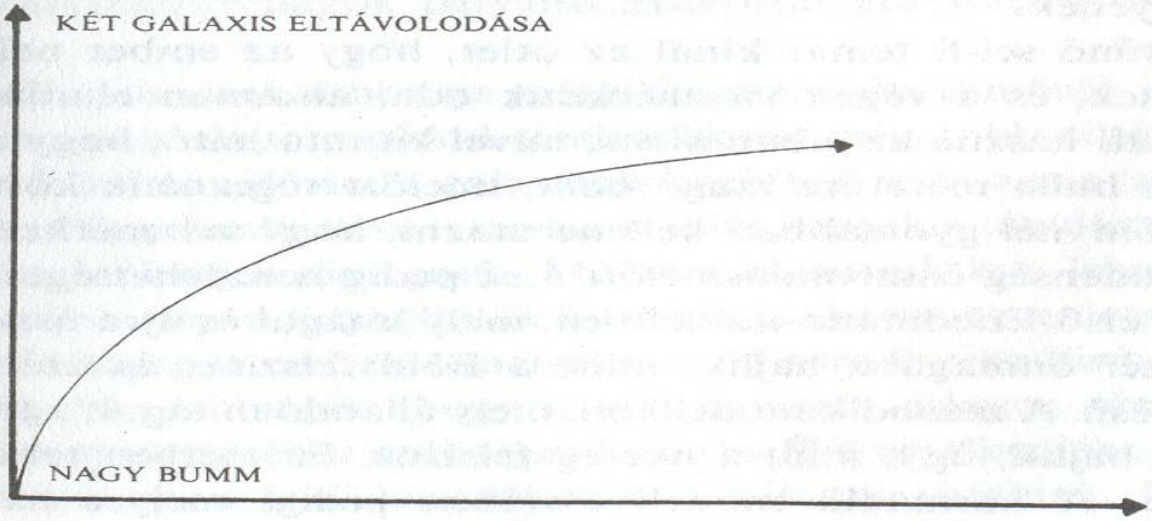
Bár Friedmann csak egy modellt talált, valójában három különböző modell is kielégíti két alapvető feltételezését. Az első típusban (ezt állította fel Friedmann) a tágulás sebessége elég lassú ahhoz, hogy a galaxisok közti gravitációs vonzás tovább lassítsa és végül megállítsa a tágulást. Ekkor a galaxisok egymás felé indulnak, a



3.2 ÁBRA



3.3 ÁBRA



3.4 ÁBRA

IDŐ

világegyetem zsugorodni kezd. A 3.2. ábra két szomszédos galaxis távolságának alakulását mutatja az idő függvényében. A távolság nullánál indul, maximumot ér el, majd ismét nullára csökken. A második megoldás esetében a tágulás olyan gyors, hogy a gravitáció csak lassíthatja, de nem állíthatja meg. A 3.3. ábra a galaxisok távolodását mutatja ebben a modellben. A távolság nulláról

indul, egy idő után a galaxisok egyenletes sebességgel távolodnak egymástól. Végül a harmadik megoldástípusnál a világegyetem éppen elegendő sebességgel tágul ahhoz, hogy a zsugorodás soha ne következzék be. Ez esetben a galaxisok távolsága, ahogy a 3.4. ábra mutatja, nulláról indul és állandóan nő, a távolodás sebessége egyre kisebb és kisebb lesz, bár sosem éri el a nullát.

Az első Friedmann-modell figyelemre méltó vonása, hogy az általa leírt világegyetem a térben nem végtelen, de határa sincs. A gravitáció olyan erős, hogy a tér önmaga köré hajlik, hasonlóan a Föld felszínéhez. Ha elég sokáig utazunk egy irányban a Földön, sose találjuk szembe magunkat leküzdhetetlen fallal, és a peremről se zuhanunk le, hanem előbb-utóbb visszaérkezünk oda, ahonnan elindultunk. Ugyanilyen a tér is Friedmann első modelljében, csak éppen három dimenzió felel meg a Föld két felszíni dimenziójának. A negyedik dimenzió, az idő, szintén véges kiterjedésű, azonban inkább szakaszra emlékeztet, melynek eleje és vége is van. Később majd látni fogjuk, hogy ha az általános relativitáselméletet a kvantummechanika határozatlansági elvévei egyesítjük, mind a tér, mind az idő számára lehetségessé válik, hogy végesek és mégis határtalanok legyenek.

Kitűnő sci-fi témát kínál az ötlet, hogy az ember nekivág a világűrnek, és a végén visszaérkezik oda, ahonnan elindult. Sok gyakorlati haszna azonban nincs, mivel kimutatható, hogy a világegyetem nulla méretűre zsugorodik, mielőtt végeznénk körsétánkkal. A fénynél gyorsabban kellene utazni, hogy visszaérkezzünk a világmindenség összeomlása előtt - ez pedig nem lehetséges!

Az első Friedmann-modéllben, mely kitágul és újra összehúzódik, a tér önmagába hajlik, mint a Föld felszíne, és ezért véges kiterjedésű. A második modellben, mely állandóan tágul, a tér ellenkezőleg hajlik, úgy, mint a nyereg felszíne. Ez esetben tehát a tér végtelen. A harmadik modell esetében pedig, melyre az éppen kritikus tágulási sebesség jellemző, a tér sík (tehát szintén végtelen).

Jó, de melyik Friedmann-modell irja le világegyetemünket? Abbahagyja-e az univerzum előbb-utóbb a tágulást, és zsugorodni kezd, vagy mindörökké tágulni fog? E kérdés megválaszolásához ismernünk kell a tágulás jelenlegi sebességét és a világegyetem jelenlegi átlagos sűrűségét. Ha a sűrűség bizonyos, a tágulás sebességéből számított kritikus érték alatt marad, akkor a gravitációs vonzás nem állíthatja meg a tágulás folyamatát. A kritikust meghaladó sűrűség esetén viszont a gravitáció egyszer majd lefékezi a tágulást, és újra összehúzódásra készteti a világegyetemet.

A tágulás jelenlegi sebességét úgy határozhatjuk meg, hogy a Doppler-jelenség révén megmérjük a tőlünk távolodó galaxisok sebességét. Ezt a mérést nagy pontossággal el tudjuk végezni. A galaxisok távolságát viszont csak közvetett módszerekkel, tehát elég pontatlanul mérhetjük meg. Így csak annyit tudunk, hogy a világegyetem minden egymilliárd évben 5-10 százalékkal tágul. A világegyetem pillanatnyi átlagos sűrűségét illetően még nagyobb a bizonytalanságunk. Ha a galaxisunkban és más galaxisokban ismert összes csillag tömegét összeadjuk, a világegyetem tágulásának meg. állításához szükséges tömegnek alig egy századrészét kapjuk, még ha a tágulás sebességének legalacsonyabb becslését vesszük is figyelembe. Mind a Tejút, mind pedig a többi galaxis azonban feltétlenül tartalmaz jelentős mennyiségű "sötét anyagot" is; ezt az anyagot közvetlenül nem látjuk, értesülünk viszont létezéséről a galaxisokban keringő csillagok pályáira gyakorolt gravitációs befolyása révén.

Sőt: a galaxisok többsége galaxishalmazokba tömörül, s a galaxisok mozgása alapján okkal tételezzük fel még több sötét anyag létezését a halmazokban; a galaxisok között. Ezeket az anyagmennyiségeket figyelembe véve is csak tizedét kapjuk a tágulás megfordításához szükséges tömegnek. Mégsem zárhatjuk ki a lehetőséget, hogy további olyan anyagfajták léteznek csaknem egyenletes eloszlásban a világegyetemben, amelyeket még nem érzékeltünk, s amelyek még biztosíthatják, hogy a világegyetem átlagos sűrűsége a tágulás megfékezéséhez szükséges kritikus fölé emelkedjék. A jelenleg birtokunkban levő bizonyítékok tehát arra utalnak, hogy az univerzum valószínűleg minden határon túl tágulni fog, viszont csak abban lehetünk biztosak, hogy még ha meg is indul valamikor a világegyetem összeomlása, biztosan van még addig vagy tízmilliárd esztendőnk, mivel a tágulás legalább ennyi ideje tart már. Emiatt tehát kár lenne aggódnunk: mire

az összeomlás ideje eljön - hacsak nem gyarmatosítottuk a Naprendszeren túli területeket - réges-rég kihal az emberiség, megsemmisül a Nappal együtt.

Friedmann összes egyenletének közös vonása, hogy valamikor a múltban (legalább tíz- és legfeljebb húszmilliárd évvel ezelőtt) a szomszédos galaxisok távolsága szükségképpen nulla volt. Ebben az időpontban, melyet Nagy Bummnak nevezünk, a világegyetem sűrűségének és a téridő görbületének végtelennek kellene lennie. Mivel a matematika a végtelen számokat nemigen tudja kezelni, ez a következmény azt jelenti, hogy az általános relativitáselmélet (melyen Friedmann megoldásai alapulnak) saját csődjét jósolja meg az univerzum egy bizonyos pontján túl. Az ilyen pont tipikus példája annak, amit a matematika szingularitásnak nevez. Voltaképpen minden tudományos elméletünk azon a feltételezésen alapszik, hogy a téridő csaknem sík és teljesen sima, ezért válnak használhatatlanná a Nagy Bumm szingularitásánál, ahol a téridő görbülete végtelen. Még ha lettek volna is események a Nagy Bumm előtt, akkor se használhatnánk őket a későbbiekben történendők megjóslására, mivel az előrejelzés lehetősége törést szenved a Nagy Bummnál. Ennek megfelelően, ha csak azt tudjuk, ami a Nagy Bumm óta történt, nem állapíthatjuk meg, hogy mi történt azelőtt. Ami minket illet, a Nagy Bumm előtt történtek semmiféle befolyást sem gyakorolhatnak ránk, tehát nem képezhetik részét a világegyetem tudományos modelljének. Ezeket tehát ki kell zárnunk a modellből, és azt kell mondanunk, hogy az idő kezdete a Nagy Bumm pillanata volt.

Sokan nem kedvelik azt az elképzelést, hogy az időnek van kezdete, feltehetően azért, mert istenibeavatkozás-ízűnek érzik. (A katolikus egyház viszont felkarolta a Nagy Bumm modellt, és 1951-ben hivatalosan bejelentette, hogy ez a modell összhangban van a Bibliával.) Többen megpróbálták hát elkerülni azt a következtetést, hogy volt egyszer egy Nagy Bumm. Legszélesebb támogatásra az állandósult állapot elmélet tett szert. Ezt a tételt 1 948-ban javasolta Hermann Bondi és Thomas Gold, akik mindketten a nácik által megszállt Ausztriából menekültek el, valamint az angol Fred Hoyle, aki a háború alatt velük együtt dolgozott a radar kifejlesztésén. Elképzelésük szerint, ahogy a galaxisok távolodnak egymástól, a közöttük megnyíló résekben folyamatosan új galaxisok keletkeznek, a folyamatosan létrejövő új anyagból. Az univerzum tehát mindenkor és mindenhonnan nagyjából ugyanúgy néz ki. Az állandósult állapot elméletéhez módosítani kellett az általános relativitást, hogy lehetővé váljék az anyag folyamatos keletkezése, a szükséges mérték azonban olyan szerény volt (kb. évente és köbkilométerenként egy részecske), hogy nem vezetett összeütközésre a tapasztalatokkal. Ez jó tudományos elmélet volt abban az értelemben, ahogy az 1. fejezetben olvashatjuk: egyszerű volt, és egyértelmű, megfigyelésekkel igazolható jóslatokat tett.

Az egyik ilyen jóslat szerint akárhová nézünk is a világűrben, azonos térfogatban azonos számú galaxist vagy hasonló objektumot kell találnunk. Az 50-es évek végén és a 60-as évek elején a világűrből érkező rádióhullámok forrásait vizsgálta egy cambridge-i csillagászcsoport Martin Ryle vezetésével (Ryle maga is a radar fejlesztésén dolgozott Bondival, Golddal és Hoyle-lal). A csoport megmutatta, hogy a legtöbb rádióforrás galaxisunkon kívül található (közülük többet más galaxisokkal azonosítottak), és hogy sokkal több a gyenge, mint az erős forrás. A gyengébb jeleket távolabbi, az erőseket közelebbi forrásoknak tulajdonították. Így viszont térfogategységenként kevesebb közönséges forrást találtak a közelebbi források esetében, mint a távolabbiakéban. Ez jelentheti azt, hogy egy nagy kiterjedésű térrész központjában vagyunk, olyanéban, amelyben kevesebb forrás található, mint másutt. Azt is jelentheti, hogy több forrás volt a múltban, amikor ezek a hullámok felénk indultak, mint most. Mindkét magyarázat ellentmondott az állandósult állapot elmélet jóslatainak. Sőt! A Penzias és Wilson által l965-ben felfedezett mikrohullámú sugárzás arra utalt, hogy a világmindenség régebben sokkal nagyobb sűrűségű volt, mint most. Az állandósult állapot elméletét el kellett hát vetni.

Két orosz tudós is megpróbálta elkerülni a Nagy Bumm - és az idők kezdete - létére utaló következtetéseket. 1963-ban Jevgenyij Lifsic és Iszaak Halatnyikov úgy vélték, hogy a Nagy Bumm csupán Friedmann modelljeinek sajátsága, e modellek pedig csupán közelítőleg írják le a világegyetemet. Lehetséges, hogy a valódi univerzumot úgy-ahogy leíró modellek közül kizárólag a Friedmann-félék jellegzetessége a Nagy Bumm típusú szingularitás. A Friedmann-modellekben a

galaxisok nyílegyenesen távolodnak egymástól- nem meglepő hát, hogy valamikor a múltban ugyanott voltak. A valódi világegyetemben viszont a galaxisok nem csak egyenes irányban távolodnak egymástól: csekély oldalirányú sebességgel is rendelkeznek. Lehet tehát, hogy a múltban sem tartózkodtak pontosan ugyanott, csak eléggé közel voltak egymáshoz. Hátha nem is egy Nagy Bumm típusú szingularitás eredménye a jelenlegi, táguló világegyetem, hanem egy korábbi összehúzódási szakaszé; hátha a világegyetem összeomlásakor nem ütközött egymásnak az összes részecske, hanem elröpültek egymás mellett, s létrehozták jelenlegi, táguló világegyetemünket. Hogy mondhatnánk meg ez esetben, hogy a valódi univerzum a Nagy Bummal kezdődött-e? A kérdést megválaszolandó, Lifsic és Halatnyikov olyan világegyetem-modelleket tanulmányoztak, melyek többé-kevésbé Friedmann-jellegűek voltak, de figyelembe vették a létező világegyetemben észlelt szabálytalanságokat, véletlenszerű sebességeket is. Kimutatták, hogy az ilyen modellek is kezdődhettek ősrobbanással, még ha a galaxisok nem is távolodnak egymástól egyenesen, de kijelentették, hogy ez csak bizonyos kivételezett modellek esetében áll fenn, azokéban, melyek szerint a galaxisok éppen a kellő módon mozognak. Érvelésük szerint végtelenszer több Friedmann-típusú modell létezik a Nagy Bumm szingularitás nélkül, mint ahány feltételezi azt, el kell tehát fogadnunk, hogy nem volt ősrobbanás. Később azonban felismerték, hogy létezik a Friedmann-modelleknek egy lényegesen általánosabb osztálya, melyben a modellek szingularitással is rendelkeznek, s a galaxisoknak sem kell különleges módon mozogniuk bennük. Állításukat ezért 1970-ben visszavonták.

Lifsic és Halatnyikov munkájának értéke abban rejlik, hogy megmutatták: a világegyetemnek lehet szingularitása, Nagy Bummja, ha az általános relativitáselmélet helytálló. A kritikus kérdés azonban nyitva maradt: megjósolja-e az általános relativitáselmélet, hogy világegyetemünknek a Nagy Bummal kellett kezdődnie, s az időnek szükségképpen van kezdete?

A választ merőben új közelítés alapján Roger Penrose brit matematikus és fizikus adta meg 1965-ben. A fénykúpok általános relativitáselmélet-megkövetelte viselkedéséből indult ki, és abból a tényből, hogy a gravitáció mindig vonzást eredményez. Ezek alapján megmutatta, hogy a saját gravitációja hatására összeroppanó csillag olyan tartományba záródik, melyek felülete végül nulla méretűre zsugorodik. S ha a tartomány felülete nullává válik, akkor a térfogata is eltűnik. A csillag anyagának teljes mennyisége zéró térfogatra nyomódik össze, az anyag sűrűsége és a tér görbülete tehát végtelenné válik. Más szavakkal, a téridő valamely tartományában szingularitást kapunk, melyet fekete lyuk néven ismerünk.

Első ránézésre Penrose eredménye csak csillagokra vonatkozott, semmit se mondott arról, hogy az egész világegyetem múltjában is Nagy Bumm típusú szingularitás rejlik-e. Amikor azonban Penrose közzétette tételét, én éppen kutató-ösztöndíjas diák voltam, és kétségbeesetten kerestem valami problémát, amivel méltóképpen fejezhetném be doktori (Ph.D.) értekezésemet. Két évvel korábban állapították meg, hogy ALS-ben (amiotrophiás laterális sclerosis) szenvedek; e betegséget általában Lou-Gehrig betegségként vagy a mozgatóidegek sorvadásaként ismerik. Értésemre adták, hogy egy-két évem van még. Ilyen körülmények között nem sok értelme volt, hogy doktori disszertációmon dolgozzam - nem számíthattam rá, hogy elkészültét is megérem. A két év azonban eltelt, és nem éreztem sokkal rosszabbul magam. Sőt egyre jobban alakultak a dolgaim, el is jegyeztük egymást egy nagyon kedves kislánnyal, Jane Wilde-dal. A házassághoz azonban állásra, az álláshoz pedig doktori címre lett volna szükségem.

1965-ben azt olvastam Penrose tételéről, hogy amennyiben bármely test gravitációs összeomlást szenved, szingularitást kell alkotnia. Hamar rájöttem, hogy Penrose tételének feltételei akkor is változatlanok maradnak, ha megfordítjuk az idő irányát, és terjeszkedésre változtatjuk az összeroppanást - feltéve, hogy a jelenlegi világegyetem közelítőleg megfelel egy nagyléptékű Friedmann-modellnek. Penrose tétele kimutatta, hogy az összeroppanó csillag szükségképpen szingularitássá válik; a fordított idejű tárgyalásból kiderült, hogy bármely Friedmann-típusú, táguló világegyetem szükségképpen szingularitással kezdődött. Technikai okok miatt Penrose tétele megkövetelte, hogy a világegyetem térben végtelen legyen. Ezt én arra használhattam, hogy bebizonyítsam: a szingularitás csak akkor jöhetett létre, ha a világegyetem elég gyorsan tágul

ahhoz, hogy elkerülje az újabb összeroppanást (mivel csak az ilyen Friedmann-modellek végtelenek a térben).

A következő néhány évben új matematikai eszközök létrehozásán dolgoztam, hogy kiiktathassam a tételekből a fenti és más technikai jellegű feltételeket, melyek azt bizonyították, hogy szingularitásoknak elő kell fordulniuk. Az eredmény a Penrose-zal közösen 1970-ben megjelentetett tanulmány volt. Ebben végre bebizonyítottuk, hogy valóban léteznie kellett Nagy Bumm típusú szingularitásnak, s ehhez mindössze arra van szükség, hogy az általános relativitáselmélet helytálló legyen, s a világegyetem éppen annyi anyagot tartalmazzon, amennyit észlelünk benne. Munkánk hatalmas ellenkezést váltott ki, részben az oroszokét, akik a tudományos determinizmusba vetett marxista meggyőződésük alapján tiltakoztak, részben pedig azokét, akik a szingularitások ötletét visszataszítónak találták, amely csak elcsúfítja Einstein elméletének szépségét. Persze az ember nemigen vitatkozhat egy matematikai tétellel. Végső soron tehát általánosan elfogadták elméletünket, és ma már szinte mindenki úgy vélekedik, hogy a világmindenségnek ősrobbanás jellegű szingularitással kellett elkezdődnie. Eléggé ironikus tehát, hogy miután meggondoltam magam, most éppen én szeretném meggyőzni a többi fizikust, hogy valójában nem is volt szingularitás a világegyetem kezdetén - mint később látjuk majd, ez a kvantum-jelenségek figyelembevételével kiküszöbölhetővé válik.

Áttekintettük ebben a fejezetben, hogyan alakult át alig fél évszázad alatt az ember évezredek során kialakított képe a világmindenségről. .Ehhez csupán kiindulásként szolgált Hubble felfedezése a táguló világegyetemről, s annak felismerése, hogy saját bolygónk mennyire jelentéktelen a hatalmas világegyetemben. Az egyre gyarapodó kísérleti és elméleti tapasztalatok birtokában mind kézenfekvőbbé vált, hogy a világegyetemnek el kellett kezdődnie valamikor; e tényt végül Penrose és jómagam bizonyítottuk be 1970-ben, Einstein általános relativitáselméletének alapján. E bizonyítás megmutatta, hogy az általános relativitáselmélet nem teljes elmélet: nem mondhatja meg, hogyan kezdődött a világmindenség, mivel előre jelzi, hogy valamennyi fizikai elmélet - köztük maga az általános relativitáselmélet is - csődöt mond a kezdet pillanatában. Mindenesetre, az általános relativitáselmélet maga nyilvánítja részleges elméletnek magát, a szingularitási tételek tehát tulajdonképpen azt mutatják ki, hogy volt olyan idő a világegyetem korai szakaszában, amikor a világegyetem kicsi mérete miatt nem tekinthetünk el a huszadik század másik nagy részleges elméletének, a kvantummechanikának kisléptékű hatásaitól.

Arra kényszerültünk a 70-es évek elején, hogy a világegyetem megértése érdekében folytatott kutatásunkat a rendkívül terjedelmes méretekre érvényes elmélet helyett a rendkívül kicsiny méretekre érvényes elméletre irányítsuk. Ezt az elméletet, a kvantummechanikát vázoljuk a következőkben, mielőtt nekivágnánk, hogy a két részleges elméletet a gravitáció kvantumelméletévé egyesítsük.

4

A HATÁROZATLANSÁGI ELV

A tudományos elméletek, mindenekelőtt Newton gravitációs elméletének sikere alapján a francia tudós, de Laplace márki a tizenkilencedik század elején a világegyetemet teljesen determinisztikusnak tartotta. Laplace véleménye szerint léteznie kell a tudományos törvények rendszerének, amely lehetővé teszi számunkra, hogy bármit megjósoljunk a világegyetemben, ha egy időpontban tökéletesen ismerjük az állapotát. Ha például ismerjük a Nap és az összes bolygó helyzetét és sebességét valamely időpontban, akkor Newton törvényei segítségével kiszámíthatjuk a Naprendszer állapotát bármely más időpontban. A determinizmus ebben az esetben eléggé nyilvánvalónak látszik. Laplace azonban tovább ment ennél, és feltételezte, hogy hasonló törvények irányítanak minden mást, egyebek közt áz emberi viselkedést is.

A tudományos determinizmus elve sokakban erős ellenállást szült, mivel sértve érezték Isten szabadságát, hogy beavatkozzék a világ dolgaiba; az elv mindazonáltal a huszadik század elejéig a

tudomány egyik általános alapelvének számított. Az elvetésére utaló első jelek akkor mutatkoztak, mikor két brit tudós: Lord Rayleigh és Sir James Jeans felvetették, hogy forró tárgyak vagy testek, például a csillagok, végtelen sebességgel sugározzák szét energiájukat. Az akkor elfogadott elméletek szerint a forró testnek elektromágneses sugárzást kell kibocsátania (mint pl. a rádióhullámok, a látható fény vagy a röntgensugárzás), mégpedig minden frekvencián egyenletesen. Így például a forró test által másodpercenként egymillió és kétmillió hullám frekvenciájú sugárzás formájában leadott energia mennyisége ugyanannyi, mint a kétmillió és hárommillió hullám frekvenciájú sugárzás formájában leadotté. Mivel pedig a hullámok másodpercenkénti száma nem korlátozott, a teljes kisugárzott energia végtelen lenne.

E nyilvánvalóan nevetséges eredmény elkerülése végett Max Planck, német fizikus 1900-ban felvetette, hogy a fény, a röntgensugarak és más hullámok nem bocsáthatók ki tetszőleges mértékben, hanem csak bizonyos csomagokban, amelyeket kvantumoknak nevezett. Továbbá, minden kvantum bizonyos energiamennyiséget hordoz, amely a hullámok növekvő frekvenciájával nő, ezért elég nagy frekvencia esetén egyetlen kvantum kibocsátása is több energiát igényelne, mint amennyi rendelkezésre áll. Így a sugárzás a nagy frekvenciák tartományában csökken, a test tehát csak véges sebességgel veszíthet energiát.

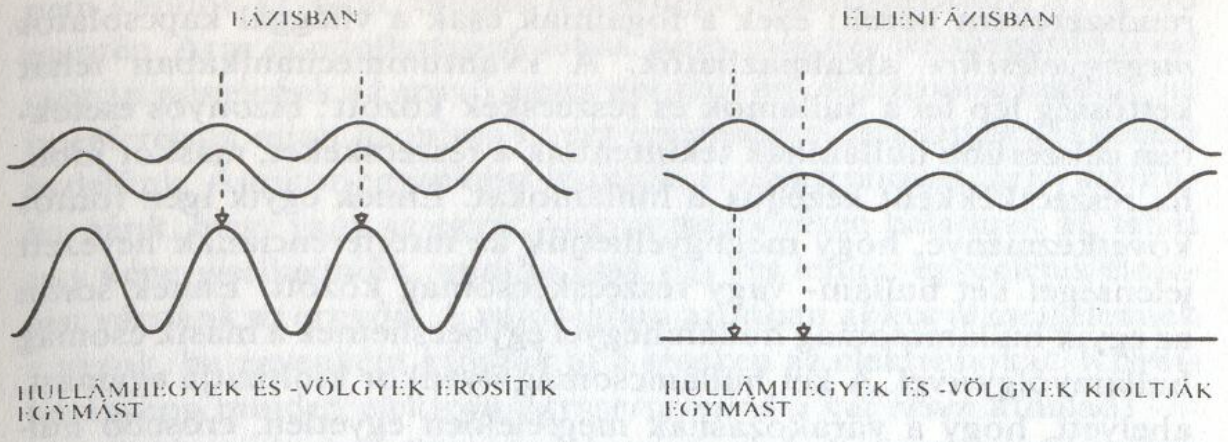
A kvantumhipotézis ragyogóan megmagyarázta a forró testek sugárzásának megfigyelt mértékét, a determinizmussal kapcsolatos súlyos következmények azonban egészen 1926-ig rejtve maradtak. Ekkor fogalmazta meg egy másik német tudós, Werner Heisenberg híres határozatlansági elvét. Egy részecske várható helyzetének és sebességének megjósolása érdekében pontosan meg kell mérnünk jelenlegi helyzetét és sebességét. Kézenfekvő módja ennek a részecske megvilágítása. A fényhullámok kisebb-nagyobb része a részecskén szóródik, s ez jelzi majd a helyzetét. E mérés azonban nem lehet pontosabb, mint a fény hullámhegyeinek távolsága, ezért a precíz méréshez rövid hullámhosszú fényt kell használni. Planck kvantumelméletének értelmében viszont a fény mennyisége nem lehet tetszőlegesen kicsiny: legalább egy fénykvantumot igénybe kell venni. Ez a kvantum azonban megzavarja a részecske pályáját és megváltoztatja sebességét, mégpedig előre meg nem jósolható módon. Sőt minél pontosabban mérjük a helyzetet, annál rövidebb hullámhosszú fényre lesz szükségünk, azaz annál nagyobb energiájú lesz az egy szem fénykvantum. A részecske sebessége tehát nagyobb mértékben torzul. Más szavakkal, minél pontosabban próbáljuk megmérni a részecske helyzetét, annál pontatlanabbul mérhetjük meg a sebességét, és megfordítva. Heisenberg kimutatta, hogy ha összeszorozzuk a részecske helyzetének bizonytalanságát, a sebességének bizonytalanságát és a tömegét, az eredmény sose lehet kisebb egy bizonyos számnál, amelyet Planck-állandóként ismerünk. Mi több, ez a határérték független a részecske sebességének vagy helyzetének megmérésére választott módszertől vagy a részecske típusától: Heisenberg határozatlansági elve a világ alapvető, kikerülhetetlen sajátossága. A határozatlansági elv óriási hatást gyakorolt világképünkre. A felfedezése óta eltelt több mint ötven év sem volt elegendő a filozófusok számára, hogy minden vonatkozását kiértékeljék, s következményei mindmáig számos vita alapjául szolgálnak. A határozatlansági elv véget vetett Laplace tudományelméleti álmának, amelyet a tökéletesen determinisztikus világegyetem modelljéről szőtt: nyilvánvalóan képtelenek vagyunk pontosan megjósolni a majdani eseményeket, ha a világegyetem jelenlegi állapotát se határozhatjuk meg pontosan! Továbbra is elképzelhetjük viszont, hogy létezik olyan szabálygyűjtemény, amely az eseményeket valamely természetfölötti lény számára határozza meg; e lény képes lehetne a világmindenség jelenlegi állapotának megfigyelésére, anélkül, hogy befolyásolná ezt az állapotot. A világegyetem ilyen modelljei azonban nem különösebben érdekesek a magunkfajta közönséges halandók számára. Célszerűbb, ha a gazdaságosság elvéhez folyamodunk, elővesszük Occam (William of Occam v. Ockham: angol filozófus a XIV. században) beretváját, és lemetéljük az összes olyan részletet az elméletről, amelyet nem lehet megfigyelni. Ez a felfogás vezette Heisenberget, Erwin Schrödingert és Paul Diracot az 1920-as években arra, hogy újjáalakítsák a mechanikát, és létrehozzák a határozatlansági elven nyugvó, kvantummechanikának nevezett új elméletet. Ebben az elméletben a részecskéknek már nincs elkülönített, jól definiált helyzetük és sebességük, amelyeket meg lehetne figyelni.

Ehelyett sebességük és helyzetük kombinálásából adódó kvantumállapotuk van.

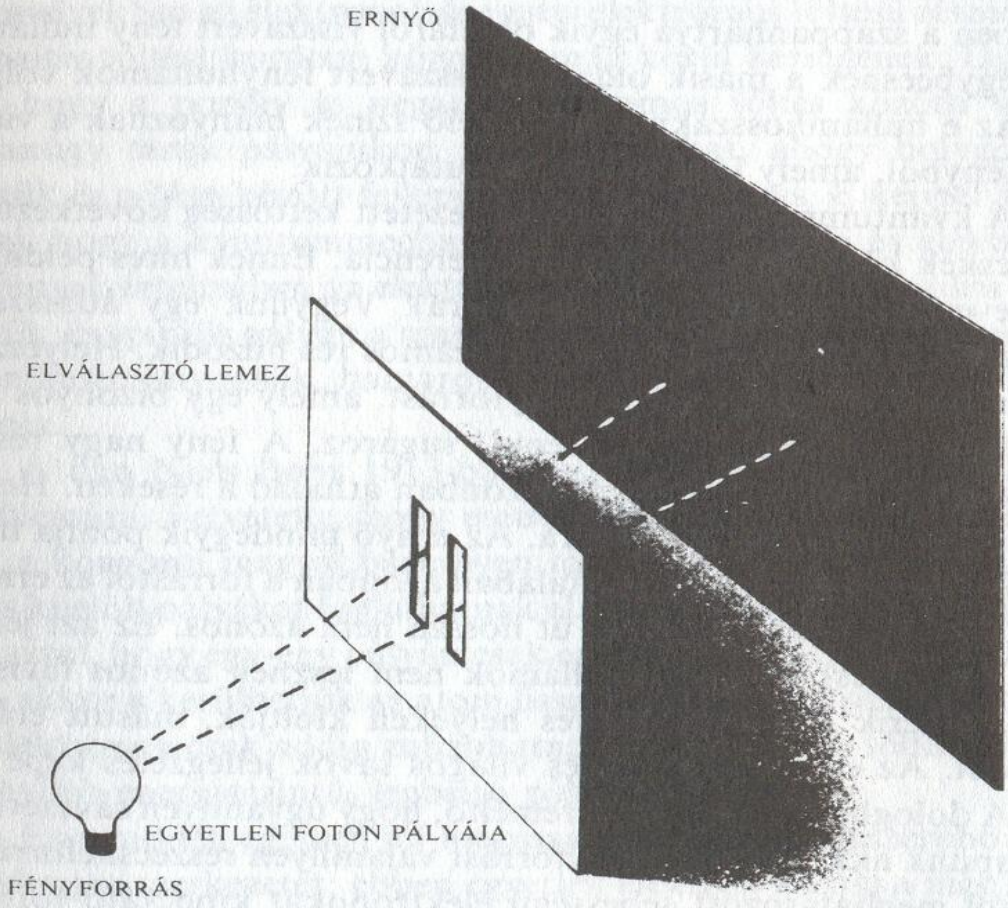
A kvantummechanika általában nem jósol egyetlen határozott eredményt valamely megfigyeléshez. Ehelyett az esemény több, eltérő lehetséges kimenetelét adja meg, és megmondja, melyiknek mekkora a valószínűsége. Ez annyit jelent, hogy ha nagyszámú hasonló rendszeren ugyanazt a mérést végezzük,. és a mérések mindegyike ugyanolyan körülmények között indult, akkor úgy találjuk, hogy bizonyos számú esetben az eredmény A lesz, míg B, C stb. más-más számban fordul elő. Meg tudjuk jósolni, hogy körülbelül hányszor lesz A vagy B az eredmény, de nem tudjuk megmondani, hogy valamely egyedi mérésnek mi lesz az eredménye. A kvantummechanika tehát bevezeti a tudományba a megjósolhatatlanság vagy véletlenszerűség elkerülhetetlen elemét. Az elmélet létrejöttében játszott kimagasló szerepének dacára Einstein nagyon erélyesen ellenezte ezt a felfogást. Nobel-díjat ítéltek oda számára a kvantummechanika létrejöttéhez nyújtott hozzájárulásáért, pedig sohasem fogadta el, hogy a világegyetemet a véletlen igazgatja. Érzéseit szállóigévé vált mondásában összegezte: "Isten nem vet kockát".

A tudósok többsége azonban készségesen elfogadta a kvantumelméletet, mivel az tökéletesen megegyezett a kísérleti tapasztalatokkal. A kvantummechanika kiemelkedően sikeres. elméletnek bizonyult, s alapjául szolgál szinte mindennek a modern tudományban és technológiában. A kvantummechanika szabályozza a tranzisztorok és integrált áramkörök viselkedését, márpedig ezek számos elektronikai eszköz, például televíziók és számítógépek legfontosabb alkatrészei. A kvantummechanika egyszersmind a modern kémia és biológia alapja is. A fizikai tudományok körében mindössze két területnek: a gravitáció elméletének és a világegyetem nagyléptékű szerkezetének nem sikerült kellőképpen magába olvasztania a kvantummechanikát.

Bár a fényt hullámok alkotják, Planck kvantumelmélete szerint a fény olykor úgy viselkedik, mintha részecskékből állna: csak "adagokban", vagy kvantumokban bocsátható ki és nyelhető el. Másfelől pedig Heisenberg határozatlansági elve arra utal, hogy a részecskék bizonyos szempontból hullámok módjára viselkednek: nincs határozott helyzetük, hanem valamilyen valószínűség-eloszlással "szétkenődnek". A kvantummechanika elmélete merőben új típusú matematikán nyugszik, amely a való világot nem részecskék és hullámok



4.1 ÁBRA



4.2 ÁBRA

rendszereként kezeli: ezek a fogalmak csak a világgal kapcsolatos megfigyelésekre alkalmazhatók. A kvantummechanikában tehát kettősség lép fel a hullámok és részecskék között: bizonyos esetekben célszerűbb hullámnak tekintenünk a részecskéket, máskor jobb, ha részecskékként kezeljük a hullámokat. Ennek egyik igen fontos következménye, hogy megfigyelhetjük az

interferenciának nevezett jelenséget két hullám- vagy részecskecsomag között. Ennek során az egyik hullámcsomag hullámhegyei egybeeshetnek a másik csomag hullámvölgyeivel. A két hullámcsomag ilyenkor kiolthatja egymást, ahelyett, hogy a várakozásnak megfelelően egyetlen, erősebb hullámmá olvadnának (4.1. ábra). Fény esetében az interferencia ismerős példája a szappan buborék ok felszínének tarka színjátszása" Ezt a buborékot alkotó vékony vízhártya két oldaláról visszaverődő fény okozza. A fehér fény az összes elképzelhető hullámhosszú fényhullámot - azaz színt - tartalmazza. Bizonyos hullámhosszok esetében a szappanhártya egyik oldaláról visszavert fény hullámhegyei egybeesnek a másik oldalról visszavert fényhullámok völgyeivel. Az e hullámhosszaknak megfelelő színek hiányoznak a visszavert fényből, amely így színesnek mutatkozik.

A kvantummechanika által bevezetett kettősség következtében részecskék között is létrejöhet interferencia. Ennek híres példája az úgynevezett kétrés-kísérlet (4.2. ábra). Vegyünk egy átlátszatlan lemezt, amelyen két keskeny, párhuzamos rés húzódik. Helyezzünk el a lemez egyik oldalán egy fényforrást, amely egy bizonyos színt (tehát egyféle hullámhosszú fényt) sugároz. A fény nagy része a lemeznek ütközik, kisebb része azonban áthalad a réseken. Helyezzünk ernyőt a lemez túloldalára. Az ernyő mindegyik pontja mindkét résből kap hullámokat. Általában azonban a forrástól az ernyőig a két résen keresztül megtett. út hossza nem azonos. Ez azt jelenti, hogy a két résből érkező hullámok nem lesznek azonos fázisban, amikor elérik az ernyőt: egyes helyeken kioltják, másutt erősítik egymást. Az eredmény sötét és világos sávok jellegzetes képe lesz.

A dologban az a figyelemreméltó, hogy ugyanilyen sávszerkezetet kapunk akkor is, ha a fényforrást valamilyen részecskeforrással, például meghatározott sebességű elektronokat kibocsátó forrással helyettesítjük (az adott sebesség adott hullámhossznak felel meg). A dolog annál is különösebb, mivel ha csak egy rést helyezünk el, nem kapunk sávokat, csupán összefüggő elektroneloszlást az ernyő mentén. Arra gondolhatnánk tehát, hogy még egy rés megnyitásával csupán növelnénk az ernyő egyes pontjait érő elektronok számát, az interferencia miatt azonban itt-ott éppenséggel intenzitáscsökkenést észlelünk. Amikor egyenként indítjuk az elektronokat, arra számíthatnánk, hogy vagy az egyik, vagy a másik résen haladnak át, tehát úgy kéne viselkedniük, mintha csak egy rés lenne: egyenletes eloszlást várnánk az ernyőn. A valóságban azonban akkor is megjelennek a sávok, ha egyenként küldjük át a réseken az elektronokat. Következésképp minden elektron egyszerre mind a két résen áthalad! A részecske-interferencia jelenségének kulcsfontosságú szerepe volt abban, hogy megértsük az atomok szerkezetét, az atomokét, amelyek a kémia és biológia alapvető egységei, saját testünknek és a bennünket körülvevő dolgoknak építőkövei. Századunk elején az atomokat a Nap körül keringő bolygók hasonlatosságára képzelték el, amelyekben az elektronok (negatív elektromos töltésű részecskék) a pozitív töltést hordozó központi mag körül keringenek. Úgy vélték, hogy a pozitív és negatív elektromos töltés közötti vonzás ugyanúgy tartja pályájukon az elektronokat, ahogy bolygókat a köztük és a Nap között fellépő gravitációs vonzás. E képpel az volt a baj, hogy a kvantummechanika előtti mechanikai és elektromos törvények értelmében az elektronoknak energiát kellett volna veszíteniük, és spirális pályán a magba zuhanniuk. Így pedig az atomnak, sőt minden anyagnak, hamarosan igen nagy sűrűségre kéne zsugorodnia.

A dán Niels Bohr 1913-ban részleges megoldást talált erre a problémára. Felvetette, hogy esetleg az elektronok nem keringhetnek a központi magtól bármilyen távolságra, hanem csupán bizonyos kijelölt pályákat foglalhatnak el. Ha ezt a feltételezést kiegészítjük azzal, hogy egy-egy pályán csak egy vagy két elektron tartózkodhat, akkor elkerülhetjük az atom összeomlásának problémáját, mert az elektronok csak addig zuhanhatnak, amíg fel nem töltik a legalacsonyabb energiaszintű, legbelső pályákat.

Ez a modell egészen jól megmagyarázta a legegyszerűbb atom, a hidrogén szerkezetét; ebben egyetlen elektron kering a mag körül. Tisztázatlan volt azonban a modell kiterjesztésének lehetősége bonyolultabb atomokra, nem is beszélve arról, hogy a korlátozott számú megengedett pályák ötlete fölöttébb önkényesnek látszott. Az új elmélet, a kvantummechanika áthidalta ezt a nehézséget. Felfedte, hogy az atommag körül keringő elektront hullámként kezelhetjük, amelynek

hullámhossza az elektron sebességétől függ. Bizonyos pályák esetében a pálya hosszúsága az elektron hullám hosszának egész számú (tehát maradéktalan) többszörösének adódik. Az ilyen pályák esetében a hullámhegyek minden forduló után ugyanabban a helyzetben lesznek, a hullámok tehát összeadódnak : ezek a pályák megfelelnek a Bohr által megengedett pályáknak. Azoknál a pályáknál viszont, amelyek hossza nem egész számú többszöröse az elektron hullámhosszának, az elektron keringése során előbb-utóbb minden hullámhegyet kiolt egy hullámvölgy; ezek a pályák nem megengedettek.

A hullám/részecske kettősség ügyes szemléltetése az amerikai Richard Feynman által bevezetett, úgynevezett eseményösszegzés (sum-over history). Ebben a felfogásban nem számítunk arra, hogy a részecskének egyetlen előélete, egyetlen pályája lehetett a téridőben, ahogy azt a klasszikus, nem-kvantum-elméletben értelmeznénk. Ehelyett arra számítunk, hogy a részecske az A és B közti utat minden lehetséges pályán megteszi. Valamennyi pályához két szám kapcsolódik. Az egyik a hullám méretét, a másik a cikluson belüli helyzetet, a fázist rögzíti (tehát azt, hogy hullám hegy vagy hullámvölgy lesz-e ott). Az A-B pálya valószínűségét az összes szóba jövő útvonal összegzésével kapjuk. Általában a szomszédos pályák sokaságát összehasonlítva úgy találjuk, hogy a fázisok, tehát a cikluson belüli helyzetek erősen eltérnek. Emiatt az ilyen pályákhoz tartozó hullámok csaknem teljesen kioltják egymást. Lesznek azonban olyan szomszédos pályák is, amelyek esetében a fázis nem nagyon változik. Az ilyen pályák nem oltódnak ki; ezek felelnek meg Bohr megengedett pályáinak.

Ezeket az elképzeléseket konkrét matematikai formába öntve viszonylag egyszerűvé vált a bonyolultabb atomok, sőt molekulák megengedett elektronpályáinak kiszámítása is. Utóbbiakat olyan atomok alkotják, amelyeket egyszerre több mag körül keringő elektronok tartanak össze. Mivel a molekulák szerkezete, és reakciói képezik az összes kémiai és biológiai folyamat alapját, a kvantummechanika elvileg lehetővé teszi, hogy szinte mindent előre jelezzünk, amit magunk körül láthatunk - természetesen a határozatlansági elv korlátain belül. (A gyakorlatban azonban a néhánynál több elektront tartalmazó rendszerek leírásához szükséges számítások annyira bonyolultak, hogy nem tudjuk elvégezni őket.)

Úgy látszik, a világegyetem nagyléptékű szerkezetét Einstein általános relativitáselmélete kormányozza. Az ilyen elméleteket klasszikus elméletnek hívjuk, mivel nem számolnak a kvantummechanika határozatlansági elvével, holott ezt a többi elmélettel való összeférhetőség megkívánná. Csak azért nem vezet ez a hiányosság ellentmondásra a megfigyelések tapasztalataival, mert általában igen gyenge gravitációs terekkel találkozunk. A korábban tárgyalt szingularitási tételek azonban arra utalnak, hogy a gravitációs tér legalább két esetben roppant mértékben felerősödik: egyrészt a fekete lyukaknál, másrészt a Nagy Bumm során. Az ilyen erős terekben már fontosak lehetnek a kvantummechanika hatásai. Bizonyos értelemben tehát a klasszikus általános relativitáselmélet saját kudarcát vetíti előre azáltal, hogy végtelen sűrűségű pontok létezését jósolja meg, ugyanúgy, ahogy a klasszikus (tehát nem kvantum-) mechanika megjósolta saját bukását, mikor rámutatott, hogy az atomoknak végtelen sűrűségűre kéne zsugorodniuk. Egyelőre nincs birtokunkban olyan ellentmondásmentes elmélet, amely egyesítené az általános relativitáselméletet és a kvantumelméletet, de számos olyan sajátságot ismerünk, amelyekkel egy ilyen elméletnek rendelkeznie kell. A későbbi fejezetekben foglalkozunk mindennek a fekete lyukakra és a Nagy Bummra gyakorolt hatásaival. Egyelőre azonban fordítsuk figyelmünket azokra a jelenlegi erőfeszítésekre, amelyek célja, hogy a természet különféle erőire vonatkozó ismereteinket egyetlen, egyesített kvantumelméletté gyúrjuk.

5

ELEMI RÉSZECSKÉK ÉS A TERMÉSZET ERŐI

Arisztotelész elképzelése szerint négy alapelem alkotja a világegyetem minden anyagát: a föld, a levegő, a tűz és a víz. Ezekre az elemekre két erő hat: a gravitáció, a föld és a víz hajlama a süllyedésre, valamint a levitáció, a tűz és levegő hajlama a felemelkedésre. Mindmáig használjuk is

a világegyetem tartalmának arisztotelészi felosztását anyagra és erőkre.

Arisztotelész felfogása szerint az anyag folytonos, azaz levághatunk belőle egy darabot, és egyre kisebb morzsákra apríthatjuk, minden határon túl: sose találkozunk olyan anyagdarabkával, amely már nem osztható tovább. Néhány görög azonban, például Démokritosz, úgy tartották, hogy az anyag alapvetően szemcsés, és nagyszámú, különféle atom alkot mindent. (Maga az atom szó "oszthatatlant" jelent görögül.)

Évszázadokon át folyt a vita anélkül, hogy bármelyik félnek valódi bizonyítékai lettek volna, 1803-ban azonban egy brit fizikus és kémikus, John DaIton rámutatott, hogy az atomok úgynevezett molekulákká csoportosulása révén megmagyarázható az a tény, hogy a kémiai vegyületek mindig szigorú arányokban egyesülnek egymással. Ennek ellenére, a két gondolati iskola közötti vität egészen századunk elejéig nem sikerült végleg az atomisták javára eldönteni. Az egyik legfontosabb fizikai bizonyítékot Einstein nyújtotta. 1905-ben írott cikkében, amely néhány héttel a speciális relativitáselméletet taglaló híres közlemény előtt jelent meg, Einstein rámutatott, hogy a Brown-mozgás - a folyadékban lebegő porrészecskék szabálytalan, véletlenszerű mozgása - megmagyarázható azzal, hogy a folyadék atomjai a lebegő porrészecskéknek ütköznek.

Ekkoriban már sejtették, hogy az atomok végső soron nem is oszthatatlanok. Néhány évvel korábban a cambridge-i Trinity College egyik kutatója, J. J. Thomson olyan anyagi részecske létezését demonstrálta - az elektronét -, amelynek tömege még a legkönnyebb atom ezredrészénél is kisebb. Felszerelése eléggé hasonlított a mai tv-képcsőre: vörösen izzó fémszál elektronokat bocsátott ki magából, s mivel ezeknek negatív az elektromos töltésük, elektromos térben fel lehetett gyorsítani őket, mielőtt a foszforral borított képernyőnek ütköztek volna. Amikor elérték a képernyőt, fényfelvillanások keletkeztek. Hamarosan kiderült, hogy az elektronok csakis maguknak az atomoknak a belsejéből jöhettek, és 1911-ben Ernest Rutherford brit fizikus végül bebizonyította, hogy az atomoknak tényleg van belső szerkezetük: rendkívül kicsiny, pozitív töltésű magból állnak, ami körül számos elektron kering. E következtetésre az alfa-részecskék - radioaktív atomok által kibocsátott, pozitív töltésű részecskék - szóródásának vizsgálata útján jutott, miután atomokkal ütköztette őket.

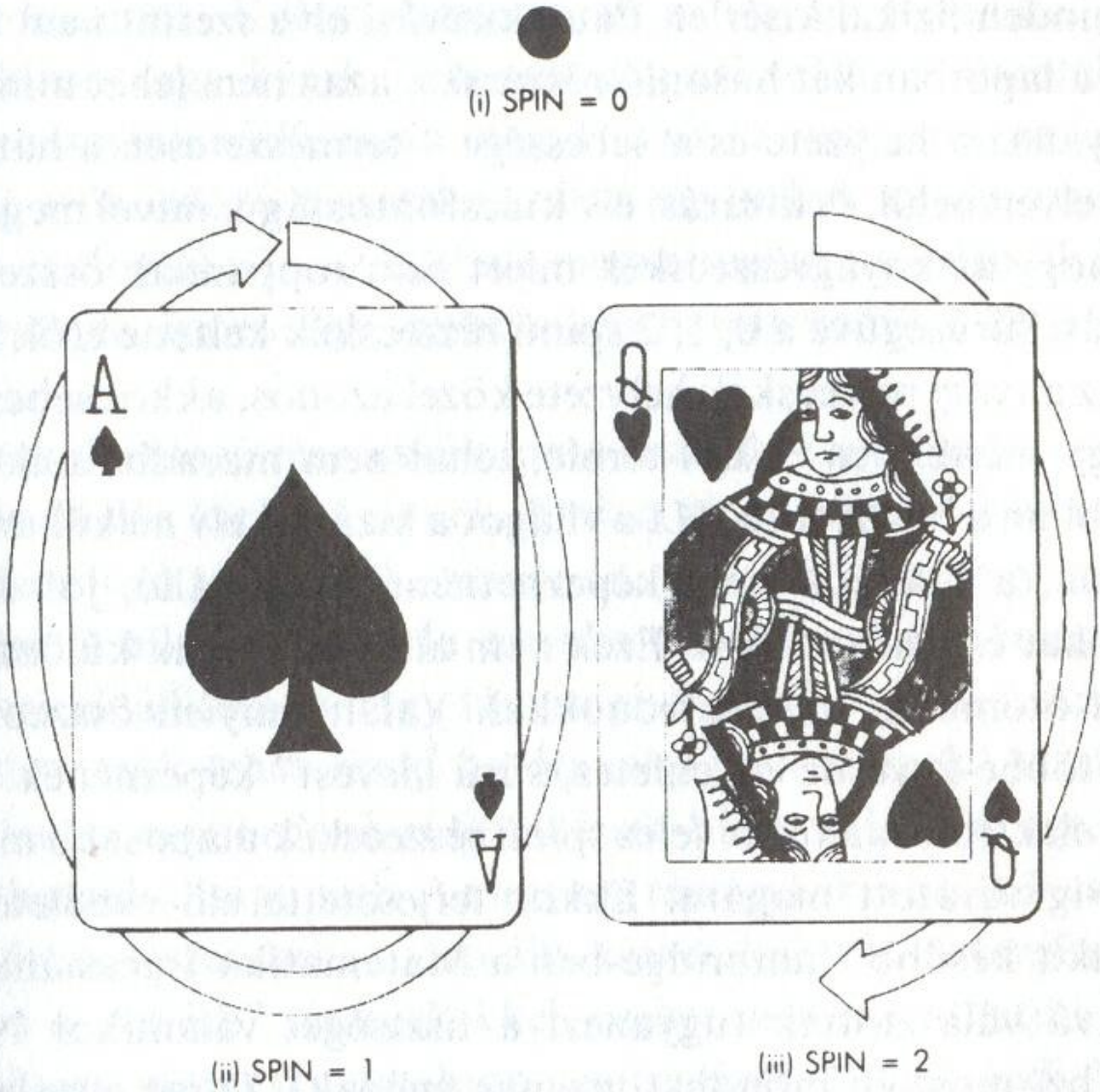
Kezdetben úgy vélték, hogy az atom magját néhány elektron és több-kevesebb pozitív töltésű részecske, proton alkotja; utóbbi nevét a görög "első" szóból nyerte, mivel azt hitték, hogy megtalálták az anyag alapvető építőkövét. 1932-ben azonban Rutherford egy cambridge-i kollégája, James Chadwick felfedezte, hogy a mag még egy részecskét tartalmaz; ezt neutronnak nevezték el, tömege közel azonos a protonéval, de elektromos töltése nincs. E felfedezéséért Chadwick Nobel-díjat kapott, és megválasztották a cambridge-i Gonville and Caius College magiszterévé (most magam is ennek az intézménynek a tagja vagyok). Később lemondott magiszteri címéről, mert összeütközésbe került a többi taggal. Akkoriban elkeseredett viták dúltak a College-ban, amióta csak fiatal tagok egy csoportja, a háborúból hazatérve, sok idős kollégát visszahívott régóta betöltött kollégiumi hivatalukból. Mindez az én időm előtt történt; magam 1965-ben csatlakoztam a College-hoz, mikor már múlóban volt egy másik Nobel-díjas magiszter, Sir Nevill Mott hasonló okok miatti lemondatásának keserűsége.

Úgy húsz évvel ezelőtt még azt hittük, hogy a protonok és neutronok "elemi" részecskék; később azonban nagy sebességű proton-proton és proton-elektron kísérletek során kiderült, hogy ezek is még kisebb részecskékből épülnek fel. E részecskéket kvarkoknak nevezte el Murray Gell-Mann, a Caltech (California Institute of Technology) fizikusa, aki 1969-ben Nobel-díjat kapott e téren végzett kutatásaiért. A név eredete egy talányos James Joyce-idézet: "Három kvarkot Muster Marknak!" (Az idézet James Joyce 1939-ben megjelent, Finnegans Wake (Finnegan ébredése) című regényéből származik.) A quark szót az angolok elvileg a quart, a liternél valamivel nagyobb űrmérték módjára ejtik, de úgy, hogy a lark, pacsirta szóra rímeljen.

A különféle kvark-változatok száma egész tekintélyes: úgy véljük, legalább hat "zamat" létezik, ezeket a felfelé, lefelé, különös, bájos, alsó és felső jelzőkkel látjuk el. Valamennyi zamathoz három "szín" tartozik, a vörös, a zöld és a kék. (Nyomatékosan meg kell jegyeznünk, hogy e jelzők csak

címkék: a kvarkok sokkal kisebbek a látható fény hullámhosszánál, ezért a szó megszokott értelmében nincs színük. Csupán a mai fizikusok meglehetősen színes fantáziájáról van szó, melyről új részecskék vagy jelenségek elnevezése során tesznek tanúbizonyságot - már nem korlátozzák elképzeléseiket görög nevekre.) A protonok és neutron ok három-négy kvarkból állnak, mindegyik más színű. A protonban két felfelé- és egy lefelékvark van, a neutronban két lefelé- és egy fölfelé-kvark. A többi kvark-típusból (különös, bájos, alsó, felső) is összeállíthatunk részecskéket, ezeknek azonban sokkal nagyobb lesz a tömegük, és nagyon gyorsan elbomlanak protonokra és neutronokra. Tudjuk már, hogy sem az atomok, sem a bennük található protonok és neutronok nem oszthatatlanok. Felvetődik hát a kérdés: melyek az igazi elemi részecskék, a tényleg alapvető építőkövek, amelyekből minden más felépül? Mivel a fény hullámhossza nagyobb, mint egy atom mérete, nem remélhetjük, hogy a szokásos módon "megnézhetjük" az atom részeit. Sokkal rövidebb hullámhosszú valamihez kell fordulnunk. Mint az előző fejezetben láttuk, a kvantummechanika szerint voltaképpen minden részecske egyben hullám is, s minél nagyobb a részecske energiája, annál rövidebb a megfelelő hullám hullámhossza. A kérdésünkre adódó legjobb válasz tehát attól függ, milyen nagy részecskeenergia áll rendelkezésünkre, mivel ez határozza meg, hogy kicsiny méretekben szemlélődhetünk. A részecskeenergiákat általában elekronvoltnak nevezett egységekben mérik. (Thomson is elektromos mezőt használt az elektronok gyorsítására a kísérletei során. Egy elektronvoltnak azt az energiát nevezzük, amelyre az elektron az egy volt nagyságú elektromos térben tesz szert.) A tizenkilencedik században, amikor az emberek még csak az égetés jellegű vegyi folyamatok néhány elektronvoltos energiáit használhatták, úgy vélték, hogy az atom a legkisebb egység. Rutherford kísérleteiben az alfa-részecskék energiája elérte a millió elektronvoltot. Később megtanultuk, hogyan alkalmazzunk elektromágneses mezőket, melyekkel eleinte néhány millió, majd néhány milliárd elektronvolt energiát adhattunk a részecskéknek. Így ma már tudjuk, hogy a húsz éve "eleminek" vélt részecskék maguk is még kisebb részecskékből állnak. Vajon ezeket is még kisebbekből felépülő részecskéknek találjuk-e, ha tovább tudjuk növelni az energiaszintet? Ez bizony elképzelhető, bár vannak elméleti okaink annak feltételezésére, hogy már megismertük, vagy nagyon közel vagyunk hozzá, hogy megismerjük a természet valóban végső építőköveit.

Az előző fejezetben tárgyalt hullám/részecske kettősség segítségével a világegyetemben mindent leírhatunk, mint részecskét - még a fényt és a gravitációt is. Ezeknek a részecskéknek van egy spinnek nevezett tulajdonságuk. A spinre gondolva tengelyük körül pörgő, pici búgócsigákat is elképzelhetünk, ez azonban félrevezető, mivel a kvantummechanika tanítása szerint a részecskéknek nincs jól definiált tengelyük. A spin valójában azt árulja el, hogy milyennek látszik a részecske más-más irányból. Egy nulla spinű részecske pontszerű: mindenhonnan egyformának látszik (5.1-i. ábra). Ha a részecske spinje 1, akkor máshonnan nézve másmilyennek látszik, úgy, mint a nyílvessző (5.I-ii. ábra). Forgatás közben csak akkor látjuk ugyanolyannak, mint kiinduláskor, ha már teljes körben (360 fok) elforgattuk.



5.1 ÁBRA

A 2 spinű részecske olyan, mint a kétfejű nyíl (5.1-III. ábra): fél fordulat (180 fok) után már ugyanolyannak látszik, mint előtte. A magasabb spinű részecskék ennek megfelelően még kisebb elfordulás után látszanak olyannak, mint kiinduláskor. Mindez egészen érthetőnek látszik, az érdekes viszont az, hogy vannak olyan részecskék is, amelyek nem látszanak ugyanolyannak, ha egyszer körbeforgatjuk őket: ehhez két egész fordulatot kell végezni! Az ilyen részecskéket feles (1/2) spinűnek nevezzük.

A világegyetem összes ismert részecskéje besorolható két osztály valamelyikébe: a feles spinűekébe - ezek alkotják a világegyetem anyagát -, vagy a 0, 1 és 2 spinűekébe, amelyek, mint majd látjuk, az anyagrészecskék közötti erőket hordozzák. Az anyagrészecskék a Pauli-féle kizárási elvnek engedelmeskednek. Ezt az elvet 1925-ben fedezte fel az osztrák Wolfgang Pauli - 1945-ben Nobel-díjat kapott érte. Pauli az elméleti fizikusok mintapéldánya volt: állítólag mihelyst betette a lábát egy városba, ott azonnal tönkrement minden fizikai kísérlet. Pauli kizárási elve szerint nem létezhet azonos állapotban két hasonló részecske, azaz nem lehet mindkettőnek ugyanaz a helyzete és a sebessége - természetesen a határozatlansági elven belül. A kizárási elv kulcsfontosságú, mivel megmagyarázza, hogy az anyagrészecskék miért nem roppannak össze és válnak óriási sűrűségűvé a 0, 1, 2 spinű részecskék keltette erők hatására: ha az anyagi részecskék helyzete közel azonos, akkor sebességüknek nagy mértékben el kell térnie, tehát nem maradhatnak sokáig ugyanabban a

helyzetben. Ha a világot a kizárási elv nélkül teremtették volna, a kvarkok nem képezhetnének különálló, jól definiált protonokat és neutronokat. Ezek nem alkothatnának különálló, jól definiált atomokat az elektronokkal. Valamennyien összeomlanának, és többé-kevésbé egyenletes, sűrű "levest" képeznének.

Az elektron és a többi feles spinű részecskék alaposabb megértése 1928-ig váratott magára. Ekkor terjesztette elő elméletét Paul Dirac, akit később Cambridge-ben a Matematika Lucasiánus Professzorává választottak (ugyanezt a tisztséget valamikor Newton töltötte be, most én mondhatom magaménak). Dirac elmélete volt az első, amely mind a kvantummechanikával, mind a speciális relativitáselmélettel összhangban volt. Matematikai magyarázatot adott arra, miért van az elektronnak feles spinje, tehát miért nem néz ki ugyanúgy egy teljes körbeforgatás után, és miért látszik ugyanolyannak a második kör végén. Az elmélet azt is megjósolta, hogy az elektronnak partnere is van: az antielektron vagy pozitron. 1932-ben fel is fedezték a pozitront, ezzel megerősítették Dirac elméletét, amiért is fizikai Nobel-díjat kapott 1933-ban. Ma már tudjuk, hogy minden részecskének van antirészecskéje, amellyel kölcsönösen megsemmisíthetik egymást. (Az erőhordozó részecskék esetében az antirészecske magával a részecskével azonos). Elképzelhető, hogy egész antivilágok és antitársadalmak épülnek fel antianyagból. Ha azonban a tisztelt olvasó az antiénjével találkozik, inkább ne rázzon vele kezet! Mindketten eltűnhetnek egyetlen hatalmas fényvillanásban. Hallatlanul fontos az a kérdés, hogy miért látunk annyival több anyagot, mint antianyagot környezetünkben; a fejezet későbbi részében vissza is térek erre.

A kvantummechanikában az egész - 0, l vagy 2 - spinű részecskéket tekintik az anyagi részecskék közötti erők vagy kölcsönhatások hordozóinak. Kölcsönhatás során az anyagi részecske, például egy elektron vagy kvark, kibocsát egy erőhordozó részecskét. Az ezzel járó visszalökődés miatt megváltozik az anyagi részecske sebessége. Az erőhordozó részecske ezután egy másik anyagrészecskével ütközik és elnyelődik. Az ütközés megváltoztatja a második részecske sebességét, éppen úgy, mintha erő hatott volna a két részecske között.

Az erőhordozó részecskék fontos tulajdonsága, hogy nem engedelmeskednek a kizárási elvnek. Emiatt nincs korlátja a kicserélhető energiahordozó részecskék számának, így ezek igen nagy erők közvetítésére is alkalmasak. Ha azonban e részecskék tömege nagy, nehéz lesz előállítani és nagy távolságból kicserélni őket. Az általuk közvetített erők tehát rövid hatótávolságúak lesznek. Másfelől viszont, ha az erőhordozó részecskének nincs saját tömege, az erő hosszú hatótávolságú lesz. Az anyagi részecskék között kicserélődő erőhordozó részecskéket virtuális részecskéknek nevezzük, mivel szemben a "valódi" részecskékkel, ezeket nem mutathatjuk ki közvetlenül egy részecske-detektor segítségével. Mégis tudjuk, hogy léteznek, mivel mérhető hatást okoznak: erőket ébresztenek anyagi részecskék között. A 0, 1 és 2 spinű részecskék bizonyos körülmények között valódi részecskékként is léteznek, és ebben a formájukban közvetlenül detektálhatók. A klasszikus fizika művelője ilyenkor hullámokról beszélne, például fény- vagy gravitációs hullámokról; ezeket anyagi részecskék bocsáthatják ki, amikor látszólagos erőhordozó részecskéket cserélve kölcsönhatásba lépnek egymással. (Például a két elektron között fellépő elektromos taszítóerő virtuális fotonok cseréjének tulajdonítható, noha ez utóbbiakat lehetetlen közvetlenül kimutatni; ha azonban egy elektron elhalad a másik mellett, valódi fotonok keletkezhetnek, s ezeket fényhullámként detektálhatjuk.)

Az erőhordozó részecskéket négy csoportba sorolhatjuk aszerint, hogy mekkora erőt hordoznak és milyen részecskékkel lépnek kölcsönhatásba. Rá kell mutatnunk, hogy ez a négy csoportba osztás emberi megfontolás eredménye; kényelmes a részleges elméletek megalkotása szempontjából, de nincs szükségképpen mélyebb oka. A legtöbb fizikus olyan egyesített elmélet kidolgozásában bízik, amely mind a négy erőt egyetlen erő különböző megjelenési formáiként írja le. Ezt sok tudós egyenesen a mai fizika elsődleges céljának tekinti.

Az első csoport a gravitáció. Ez univerzális erő, azaz minden részecske érzi a gravitációs erőt, mégpedig tömegének vagy energiájának megfelelően. A gravitáció messze a leggyengébb a négy erő közül; olyan gyenge, hogy észre se vennénk, ha nem rendelkezne két különleges tulajdonsággal:

hatalmas távolságokon át is működik, és mindig vonzó jellegű. Emiatt két nagy test, például a Nap és a Föld egyedi részecskéi között fellépő igen gyenge erők tekintélyes erővé összegződhetnek.

A másik három erő vagy rövid hatótávolságú, vagy lehet vonzó is és taszító is, mikor is gyakran kioltják egymást. Kvantummechanikai szemszögből nézve a gravitációt, a két anyagrészecske közti erőt úgy képzeljük el, mint amit egy 2 spinű részecske, a graviton hordoz. A gravitonnak saját tömege nincs, ezért az általa hordozott erő hosszú távon hat. A Nap és a Föld közötti vonzóerőt a két égitest részecskéi közötti gravitoncserének tulajdonítjuk. A kicserélt részecskék virtuálisak ugyan, hatásuk viszont nagyon is mérhető: emiatt kering a Föld a Nap körül! A valódi gravitonok megjelenési formáját a klasszikus fizika művelői gravitációs hullámoknak neveznék; ezek a hullámok rendkívül gyengék, ezért megfigyelésük hallatlanul nehéz. Mindeddig nem is sikerült kimutatni őket.

A következő csoport az elektromágneses erőé. Ez elektromosan töltött részecskékkel, például elektronokkal vagy kvarkokkal lép kölcsönhatásba, a töltetlen részecskékkel, a gravitonokkal azonban nem. Sokkal erősebb a gravitációnál: két elektron között az elektromágneses erő millió millió millió millió millió millió milliószor (negyvenkét nulla az 1 után) erősebb a tömegvonzásnál. Elektromos töltésből azonban kétféle is van, pozitív és negatív. Két pozitív töltés között mindig taszító erő lép fel, két negatív töltés között szintén. Eltérő előjelű töltések viszont mindig vonzzák egymást. Egy nagyméretű test, például a Nap vagy a Föld közel azonos mennyiségben tartalmaz pozitív és negatív töltéseket. Az egyes részecskék közötti vonzó és taszító erők ezért nagyjából kiegyenlítik egymást, úgyhogy az eredő elektromágneses erő nagyon kicsi. Az atomok és molekulák kisléptékű skáláján azonban az elektromágneses erők dominálnak.

A negatív töltésű elektron és az atommag pozitív töltésű protonjai közötti elektromágneses vonzás következtében kering az elektron a mag körül, mint ahogy a gravitációs vonzás a Földet Nap körüli pályára kényszeríti. Az elektromágneses vonzást úgy képzelhetjük el, mint nagyszámú 1 spinű, tömeg nélküli virtuális részecske - foton - cseréjét. Mint az előbb, itt is virtuális részecskék cseréjéről beszélünk. Mindazonáltal, amikor egy elektron valamely megengedett pályáról a maghoz közelebbi pályára ugrik, energia szabadul fel, és valódi foton keletkezik - ezt pedig, ha a hullámhossz megfelelő, látható fényként észlelheti az emberi szem, de kimutathatjuk fotondetektorral, például fotolemezzel is. Ha pedig egy valódi foton atomnak ütközik, az atommaghoz közeli pályáról távolabbira lökheti az elektront. Ez fölemészti a foton energiáját, ami így el is nyelődik. A harmadik csoportot gyenge magerőnek hívjuk. Ez idézi elő a radioaktivitást, és minden feles spinű anyagi részecskére hatással van. Hatástalan viszont a 0, 1 vagy 2 spinűekre, például a gravitonokra vagy fotonokra. A gyenge magerő megértése egészen 1967-ig váratott magára. Ebben az évben Abdus Salam a londoni Imperial College-ból és Stephen Weinberg a Harvardról olyan elméletet terjesztettek elő, mely ugyanúgy egyesítette ezt az erőt az elektromágneses erővel, ahogy Maxwell elmélete egyesítette száz évvel korábban az elektromos és a mágneses erőket. Elméletük szerint a foton mellett még három 1 spinű részecske létezik, amelyeket együttesen nehéz vektor bozonoknak hívnak; ezek hordozzák a gyenge kölcsönhatást. A három részecske a W+ (ejtsd: vevé plusz), a W- (ejtsd: vevé mínusz) és a Z0 (ejtsd: zé nulla). Valamennyiük tömege körülbelül 100 GeV (GeV: giga-elektronvolt, azaz egymilliárd elektronvolt). A Weinberg-Salam-elmélet érdekes vonása a spontán szimmetriafelhasadás. Ez azt jelenti, hogy ami alacsony energiaszinteken teljesen különböző részecskeként jelentkezik, az valójában ugyanaz a részecske, más-más állapotban. Nagy energiák esetén e részecskék mind egyformán viselkednek. Képzeljünk csak el például egy rulettgolyót a rulettkerékben. Nagy energiáknál - amikor a kereket sebesen pörgetjük - a golyó alapvetően egyféleképpen viselkedik: körbe-körbe gurul. Mikor a kerék lelassul, a golyó veszít energiájából, előbb-utóbb pedig belehuppan a kerék harminchét rekeszének valamelyikébe. Más szavakkal, alacsony energiaszinteken a golyó harminchét-féle állapota létezhet. Ha tehát valamilyen oknál fogva csak alacsony energiaszinteken figyelhetnénk meg a golyót, azt hihetnénk, hogy harminchét különféle típusa van!

A Weinberg-Salam-elmélet szerint 100 GeV-nál sokkal nagyobb energiák esetén a három új részecske és a foton mind hasonlóan viselkedik. Alacsonyabb energiaszinteken - a legtöbb

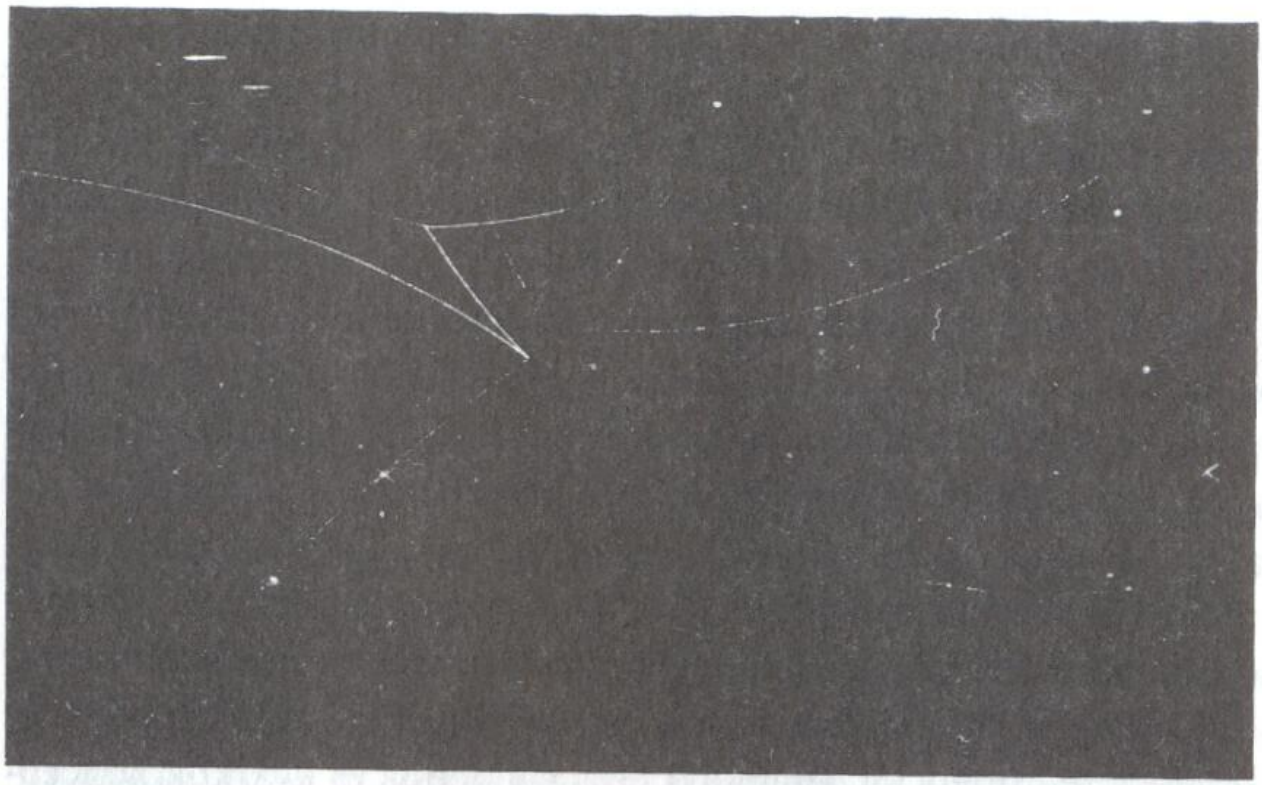
megszokott eset ilyen - a részecskéknek ez a szimmetriája megtörik. A W+, a W- és a Z0 hatalmas tömegre tesz szert, következésképpen az általuk közvetített erők nagyon rövid hatósugarúak lesznek. Amikor Salam és Weinberg közzétették elméletüket, alig néhányan hittek nekik; a részecskegyorsítók teljesítménye akkoriban még nem érte el a 100 GeV-ot, amelynél valódi W+, W- és Z0 részecskék keletkeznek. Az elmélet megjelenését követő mintegy tíz évben azonban a többi alacsonyenergiás előrejelzés olyan nagyszerűen egyezett a tapasztalatokkal, hogy 1979-ben Salam, Weinberg és a szintén harvardi Sheldon Glashow elnyerték a fizikai Nobel-díjat. Glashow is hasonló egyesített elméletet javasolt az elektromágneses és a gyenge nukleáris kölcsönhatásra. A Nobel-díj bizottság sem maradt szégyenben: 1983-ban a CERN-ben (Európai Nukleáris Kutatóközpont) felfedezték a foton mindhárom társát, és, kimutatták, hogy tömegük és egyéb tulajdonságaik pontosan egyeznek a megjósoltakkal. A néhány száz kutatóból álló csapat feje, Carlo Rubbia 1984-ben kapott ezért Nobel-díjat, megosztva Simon van der Meerrel, a CERN mérnökével, aki a kísérleteknél alkalmazott antianyag-tároló rendszert megalkotta. (Manapság roppant nehéz különlegesen maradandót alkotni a kísérleti fizikában, hacsak nincs az ember eleve a legmagasabb beosztások valamelyikében.)

A negyedik csoportba az erős magerők tartoznak. Ezek tartják össze a kvarkokat a neutronokban és protonokban, illetve a neutronokat és protonokat az atommagokban. Úgy véljük, hogy az erős magerőket egy újabb 1 spinű részecske, a gluon (a latin gluten, enyv szóból) hordozza; ez csak önmagával és a kvarkokkal lép kölcsönhatásba. Az erős magerők különös sajátsága az összezárás (confinement): mindig színtelen kombinációban kötik össze a részecskéket. Egyetlen kvark sem kószálhat magányosan, mivel akkor színes lenne (piros, kék vagy zöld). A piros kvarknak egy gluon-"szalag" segítségével triplettet kell alkotnia egy kék és egy zöld kvarkkal (piros + kék + zöld = fehér). Az ilyen triplett lehet proton is és neutron is. A kvark egy antikvarkkal is kapcsolódhat (piros + anti-piros, vagy kék + anti-kék, vagy zöld + anti-zöld = fehér). Ezeket a kombinációkat mezonoknak hívjuk. A mezonok nem stabilisak, mivel a kvark és az antikvark megsemmisíthetik egymást, miközben elektronokat és más részecskéket hoznak létre. Az összezárás azt sem engedi, hogy egy gluon magában maradjon, mivel a gluonoknak is van színük. Olyan gluoncsoportok képzelhetők csak el, amelyek színei együtt fehéret adnak. E csoportok instabil részecskéket képeznek, ezeket enyvgolyónak (glueball) hívjuk.

Mivel az összezárás jelensége meggátolja, hogy különálló gluonokat és kvarkokat figyelhessünk meg, bizonyos mértékben metafizikainak érezhetjük az egész fejtegetést ezekről a részecskékről. Az erős magerőknek azonban van egy sajátságuk - az aszimptotikus szabadság -, mely jól definiálttá teszi a gluonok és kvarkok koncepcióját. Szokványos energiaszintek esetében az erős magerők tényleg erősek, és jól össze is kötik a kvarkokat. Nagy részecskegyorsítókkal végzett kísérletek azonban arra utalnak, hogy magas energiákon az erős kölcsönhatás sokkal gyengébb lesz, és a kvarkok és gluonok csaknem szabad részecskék módjára viselkedhetnek. Az 5.2. ábra nagyenergiájú proton és antiproton közötti ütközésről készült fényképet mutat. Csaknem szabad kvarkok keletkeznek, melyek a képen látható "szétfröccsenő" nyomokat okozzák.

Az elektromágneses és a gyenge nukleáris kölcsönhatás egyesítésének sikere újabb erőfeszítésekre ösztönzött: a fizikusok e két erőt az erős magerővel kívánták kombinálni, hogy megalkossák a nagy egyesített elméletet, azaz angol rövidítése alapján a GUT-ot. Ez a hangzatos név meglehetős túlzás: az ide tartozó elméletek nem is olyan nagyok, s mivel a gravitációt nem tartalmazzák, egyáltalában nem egyesítettek. Még csak teljes értékű elméleteknek sem nevezhetjük őket, mivel olyan paramétereket - számértékeket - tartalmaznak, amelyek nem az elméletekből következnek: úgy kell megválasztani őket, hogy az elmélet egyezzék a kísérletek eredményeivel. Mindazonáltal a GUT így is közelebb segíthet az átfogó teljesen egyesített elmélethez.

Mi a GUT alapvető elképzelése? Mint fentebb említettem, az erős magerő magasabb energiákon elgyengül. Másrészről viszont mind az elektromágneses erő, mind a gyenge magerő - amelyek



5.2 ÁBRA

NAGY ENERGIÁVAL ÜTKÖZŐ PROTON ÉS ANTIPROTON KÉT, CSAKNEM TELJESEN SZABAD KVARKOT HOZ LÉTRE

aszimptotikus szabadságot nem mutatnak - megerősödik magasabb energiákon. Igen-igen nagy energián - a nagy egyesítési energián mindhárom erő azonos nagyságú lesz, és ezért felfoghatók ugyanannak az erőnek különféle megnyilvánulásaiként. A nagyegyesített elméletek azt is megjósolják, hogy ezen az energiaszinten a különféle feles spinű anyagi részecskék, például a kvarkok és elektronok, lényegében azonossá válnak, ami újabb egyesítés elérését jelenti.

A nagy egyesítési energia értékéről nem sokat tudunk, de legalább ezer millió millió (tizenhat nulla az 1 után) GeV-ot tartunk valószínűnek. A részecskegyorsítók jelenlegi generációja körülbelül 100 GeV energiájú részecskéket tud ütköztetni egymással, és most tervezik a néhány ezer GeV-os gépeket. A nagy egyesítési energiára gyorsító berendezés mérete akkora lenne, mint a Naprendszeré; emellett a jelenlegi gazdasági helyzetben elég nehéz lenne finanszírozót találni hozzá. Így hát lehetetlen közvetlen laboratóriumi ellenőrzésnek alávetni a nagy egyesítési elméleteket. Mindenesetre, ahogyan az elektromágneses erő és a gyenge magerő esetében, itt is vannak kis energiájú következmények, és ezek vizsgálata már lehetséges.

A legérdekesebb közülük az az állítás, amely szerint a közönséges anyag tömegének nagy részét alkotó protonok spontán módon könnyebb részecskékre, például antielektronokra hasadhatnak. Ez abból következik, hogy a nagy egyesítési energia szintjén nincs lényeges különbség a kvark és az antielektron között. A protonon belüli három kvarknak normális esetben nincs elég energiája, hogy átváltozzék antielektronná, nagyon ritkán azonban egy-egy kvark összeszedheti az ehhez szükséges energiát, mivel a határozatlansági elv értelmében a protonon belüli kvarkok energiáját nem lehet pontosan rögzíteni. Ekkor tehát a proton elbomlik. E folyamat valószínűsége olyan kicsi, hogy legalább millió millió millió millió millió (harminc nulla az 1 után) évig kellene várni rá. Ez sokkal hosszabb, mint a Nagy Bumm óta eltelt alig tízezer millió (tíz nulla az 1 után) év. Arra

gondolhatnánk tehát, hogy a spontán proton bomlás lehetőségét sem lehet kísérletileg ellenőrizni. A bomlás észlelésének esélyét azonban megnövelhetjük, ha óriási mennyiségű, sok protont tartalmazó anyagot figyelünk meg. (Ha például harminc nulla az 1 után darab protont figyelünk meg egy éven át, akkor a legegyszerűbb GUT alapján egynél több spontán proton bomlást észlelhetünk.) Számos ilyen kísérletet végeztek, de egyik sem szolgált pozitív eredménnyel a protonok vagy neutronok spontán bomlásáról. Az egyik kísérletet az Ohio állambeli Morton sóbányában végezték, nyolcezer tonna víz felhasználásával (a helyet úgy választották ki, hogy kizárhassák a protonbomlással összetéveszthető, a kozmikus sugárzás kiváltotta események bekövetkeztét). A kísérlet során nem tudtak spontán protonbomlást kimutatni, amiből kiszámítható, hogy a proton várható élettartama meghaladja a tíz millió millió millió millió millió (harmincegy nulla az 1 után) évet. Ez hosszabb, mint a legegyszerűbb GUT által jósolt érték, egyes gondosabban kimunkált elméletek azonban még ennél is hosszabb élettartamot jósolnak. Még érzékenyebb, még nagyobb tömegű anyagra kiterjedő vizsgálatokra lesz szükség ezek ellenőrzéséhez.

Bármilyen nehéz is spontán protonbomlást megfigyelni, előfordulhat, hogy puszta létünk is a fordított folyamat, a protonkeletkezés, illetve az alapvetőbb kvarkkeletkezés következménye: a világegyetem kezdetét ugyanis legkézenfekvőbb úgy elképzelni, hogy akkor a kvarkok száma nem haladta meg lényegesen az antikvarkokét. A Föld anyagát elsősorban protonok és neutronok alkotják, amelyek viszont kvarkokból állanak. Antikvarkokból felépülő antiprotonok és antineutronok nincsenek a Földön (eltekintve attól a néhánytól, amelyeket a fizikusok állítanak elő részecskegyorsítóikban). A kozmikus sugarak révén bizonyítékaink vannak arról, hogy galaxisunk összes anyagával kapcsolatban ugyanez a helyzet: nincsenek antiprotonok és antineutronok, eltekintve a nagyenergiájú ütközések következtében keletkező, kisszámú részecske-antirészecske pártól. Ha kiterjedt antianyag-tartományok léteznének galaxisunkban, akkor élénk sugárzást észlelnék az anyag-antianyag határokról, ahol sok részecske találkozna a megfelelő antirészecskével, és a kölcsönös megsemmisülés során jelentős mennyiségű, nagy energiájú sugárzás szabadulna fel.

Nincs közvetlen bizonyítékunk arról, hogy a többi galaxist protonok és neutronok, vagy antiprotonok és antineutronok alkotják-e, de csak az egyik alkothatja őket. Egyetlen galaxison belül a kettő együtt nem fordulhat elő, mivel észlelnünk kellene a megsemmisülésükkel járó sugárzást. Ezért úgy véljük, mindegyik galaxis kvarkokból áll, nem pedig antikvarkokból; valószínűtlen, hogy egyes galaxisokat anyag, másokat pedig antianyag építsen fel.

Vajon miért létezik annyival több kvark, mint antikvark? Miért nem egyenlő a számuk? Szerencsénk, hogy nem egyenlő, hiszen ha az lenne, akkor már a világegyetem korai fejlődési szakaszában megsemmisítették volna egymást, és a mindenséget megtöltötték volna sugárzással, de mással - anyaggal - alig. Akkor pedig nem keletkezhettek volna galaxisok, se csillagok vagy bolygók, amelyeken értelmes élet fejlődhetne. A nagy egyesített elméletek megmagyarázhatják, miért kell a világegyetemnek több kvarkot tartalmaznia, mint antikvarkot, még akkor is, ha számuk az indulásnál nagyjából megegyezett. Mint láttuk, a GUT megengedi, hogy a kvarkok nagy energiaszinteken antielektronokká változzanak. Ezek az elméletek a fordított folyamatot is lehetővé teszik, ekkor antikvarkok alakulnak át elektronokká, az elektronok és antielektronok pedig antikvarkokká és kvarkokká. A világegyetem nagyon korai szakaszában egy ideig akkora volt a forróság, hogy a részecskeenergiák elérték az átalakuláshoz szükséges küszöböt. De miért jött ekkor létre több kvark, mint antikvark? Azért, mert a fizika törvényei nem teljesen egyformák a részecskék és az antirészecskék vonatkozásában.

Egészen 1956-ig úgy hitték, hogy a fizika törvényei az ún. C, P és T szimmetriák mindegyikének engedelmeskednek. A C szimmetria azt jelenti, .hogy a törvények azonosak a részecskékre és az antirészecskékre is. A P szimmetria ugyanazt a törvényszerűséget biztosítja a jelenség és a tükörképe esetére is (például a jobbra forgó részecske tükörpárja a balra forgó részecske). A T szimmetria értelmében a részecskék és antirészecskék mozgási irányának megfordításával a rendszer visszatér korábbi állapotába; más szavakkal: ugyanazok a törvények érvényesek akkor is, ha az idő visszafelé halad. 1956-ban két amerikai fizikus, Tsung-Dao Lee és Chen Ning Yang

felvetette, hogy a gyenge kölcsönhatás nem engedelmeskedik a P szimmetriának. Más szavakkal: a gyenge kölcsönhatás következtében a világegyetem másként fejlődik, mint ahogy a tükörképe fejlődne. Ugyanebben az évben egy kolléganőjük, Chien-Shiung Wu be is bizonyította igazukat. Mágneses térben sorakoztatta fel radioaktív anyagok magjait, úgy, hogy azok valamennyien egy irányba pörögtek, és kimutatta, hogy gyakrabban adnak le elektront az egyik, mint a másik irányba. A következő évben Lee és Yang Nobel-díjat kaptak elgondolásukért. Az is kiderült, hogy a gyenge kölcsönhatás a C szimmetriának sem engedelmeskedik. Emiatt az antianyagból felépült világegyetem másként viselkedne, mint a mienk.

A gyenge kölcsönhatás ugyanakkor engedelmeskedik az egyesített CP szimmetriának. Ha tehát minden részecskét az antirészecskéje helyettesít, akkor a világegyetem ugyanúgy fejlődik, mint a tükörképe! l964-ben azonban két másik amerikai, J. W. Cronin és Val Fitch felfedezte, hogy bizonyos részecskék - a K-mezonok - bomlása során még a CP-szimmetria sem érvényes. Cronin és Finch eredményét 1980-ban honorálták Nobel-díjjal (elég bőven hullottak díjak azért, ha valaki kimutatta, hogy a világ nem is olyan egyszerű, mint hinnénk).

Egy matematikai tétel szerint bármely elmélet, amely a kvantummechanikának és az általános relativitáselméletnek engedelmeskedik, az egyesített CPT-szimmetriának is engedelmeskedni fog. Más szavakkal: a világegyetemnek ugyanúgy kell viselkednie, ha a részecskéket antirészecskékkel helyettesítjük, a tükörképet vizsgáljuk és megfordítjuk az idő folyását. Cronin és Finch azonban kimutatták, hogy ha a részecskéket antirészecskékre cseréljük és a tükörképet vizsgáljuk, de nem fordítjuk meg az időt, akkor a világegyetem nem viselkedik ugyanúgy. A fizika törvényeinek tehát meg kell változniuk, ha megfordítjuk az idő irányát - e törvények nem engedelmeskednek a T szimmetriának.

Nyilvánvaló, hogy a korai világegyetem sem engedelmeskedett a T szimmetriának : az idő előrehaladtával az univerzum tágul; ha az idő visszafelé haladna, az univerzum összehúzódna. Mivel pedig vannak erők, melyek nem engedelmeskednek a T szimmetriának, a világegyetem tágulásával ezek az erők több antielektront alakítanak kvarkká, mint ahányelektront antikvarkká. A világegyetem tágulása és lehűlése során pedig az antikvarkok megsemmisülnek a kvarkokkal; mivel azonban a kvarkok túlsúlyban vannak, valamennyi megmarad belőlük. Ezek alkotják a körülöttünk levő anyagot, és természetesen a mi testünket is. Puszta létünk tehát a nagy egyesített elméletek igazolásának tekinthető, még ha ez az igazolás csak kvalitatív is: a bizonytalanságok túl nagyok ahhoz, hogysem megjósolhatnánk az annihiláció végén megmaradt kvarkok számát, vagy akárcsak azt, hogy kvarkok vagy antikvarkok maradnak-e többségben. (Ha az antikvarkok maradnának, akkor egyszerűen kvarkoknak neveznénk őket, a mai kvarkokat meg antikvarkoknak.) A nagyegyesített elméletek a gravitációra nem terjednek ki. Ez nem sokat számít, mivel a gravitáció hallatlanul gyenge, általában el is hanyagolhatjuk, ha atomokkal vagy elemi részecskékkel foglalkozunk. Mivel azonban hosszú távon hat és mindig vonzó, hatása összeadódik. Elég nagyszámú anyagrészecske esetében tehát a gravitáció uralkodóvá válhat az összes többi erő fölött. Ezért határozza meg éppen ez az erő a világegyetem fejlődését. Még csillagnyi méretű anyaghalmaz esetében is döntővé válhat a gravitáció szerepe, ami a csillag összeroppanásához vezethet. 1970-es munkám a csillagok összeroppanása során keletkező fekete lyukakra és a körülöttük kialakuló óriási gravitációs térre összpontosult. Ez vezetett az első utalásra a kvantummechanika és az általános relativitáselmélet esetleges kölcsönhatásáról - a gravitáció majdan kidolgozandó kvantumelméletének jellegéről.

FEKETE LYUKAK

A fekete lyuk kifejezés nagyon fiatal. 1969-ben találta ki az amerikai John Wheeler, amikor egy legalább kétszáz éves elgondolást akart szemléltetni. Akkoriban két elmélet létezett a fényről. Az egyik szerint - ezt támogatta Newton - a fényt anyagi részecskék, a másik szerint pedig hullámok alkotják. Ma már tudjuk, hogy mindkét elmélet helyes volt. A kvantummechanikából következő hullám/részecske kettősség értelmében a fényt hullámként és részecskeként is felfoghatjuk. A fény hullámtermészetét kiemelő elmélet tisztázatlanul hagyta a gravitációnak a fényre gyakorolt hatását.

Ha viszont a fényt is részecskék alkotják, akkor a gravitációnak ugyanúgy kell hatnia rájuk, mint az ágyúgolyókra, repülőgépekre vagy rakétákra.

Eleinte azt hitték a kutatók, hogy a fény részecskéi végtelen gyorsan terjednek, a gravitáció tehát képtelen lelassítani őket. Roemer azonban felfedezte, hogy a fény terjedési sebessége véges; emiatt viszont számítani lehetett a gravitáció jelentős hatására.

Ezen a feltevésen alapult John Michell cambridge-i professzor közleménye, amely 1783-ban jelent meg a Philosophical Transactions of the Royal Society of London című lapban. Ebben rámutatott: ha valamely csillag tömege és sűrűsége elég nagy, akkor gravitációs mezeje olyan óriási lehet, hogy a fény nem tud kiszökni belőle: a csillag gravitációs ereje egykettőre visszarángatná a felszínről kibocsátott fényt. Michell nagyszámú ilyen csillag létezésének a lehetőségét vetette fel. Ezeket nem láthatnánk, hiszen a fény nem hagyhatja el őket, érezhetjük viszont gravitációs vonzásukat. Az ilyen objektumokat nevezzük ma fekete lyukaknak, hiszen azok: fekete hézagok az űrben. A jelek szerint Michelltől függetlenül jutott néhány évvel később ugyanerre az eredményre a francia de Laplace márki. Érdekes, hogy Laplace könyve, A világ rendszere első két kiadásában tüntette csak fel ezt az elgondolást, a későbbiekben már nem; nyilván ostobaságnak minősítette az ötletet. (A fényrészecske elmélete a tizenkilencedik században ráadásul háttérbe is szorult; úgy látszott, minden megmagyarázható a fény hullám természetével, ez esetben viszont kérdéses, hogy befolyásolja-e egyáltalán a gravitáció a fényt.) Voltaképpen nem jogos ágyúgolyókként tekinteni a fényrészecskéket Newton gravitációs elméletében, mivel a fény sebessége rögzített. A Földről felfelé kilőtt ágyúgolyót lelassítja a gravitáció, a golyó előbb-utóbb megáll, majd visszaesik; a foton viszont egyenletes sebességgel halad fölfelé.

Hogyan befolyásolja hát a newtoni gravitáció a fényt? A fény és gravitáció kölcsönhatásának ellentmondásmentes elméletére egészen 1915-ig, Einstein általános relativitáselméletének megjelenéséig várni kellett. S még ezután is sok idő eltelt, mielőtt a nagy tömegű csillagokra vonatkozó következmények közismertté váltak volna.

A fekete lyuk képződésének megértése végett először a csillagok életciklusát kell megismernünk. Csillag akkor keletkezik, mikor nagy mennyiségű gáz (többnyire hidrogén) saját tömegvonzásának hatására önmagába roskad. A gázfelhő összehúzódása közben a gázatomok mind gyakrabban és mind nagyobb sebességgel ütköznek egymásnak - a gáz felmelegszik. Előbb-utóbb eléri azt a hőmérsékletet, melyen az összeütköző hidrogénatomok nem pattannak le egymásról, hanem összetapadnak és héliummá alakulnak. Ez a reakció tulajdonképpen szabályozott hidrogénbomba-robbanás; a felszabaduló hő hatására világít a csillag. A hőtöbblet egyszersmind a gáz nyomását is növeli, amíg az végül kiegyenlíti a gravitáció összehúzó erejét; ekkor megszűnik a zsugorodás. Hasonlít a helyzet a léggömbhöz, amit a belső gáz nyomása szétfeszíteni, a gumi rugalmassága pedig összehúzni igyekszik. A csillagok hosszú időn át megőrzik stabilitásukat, mivel a nukleáris folyamatok során fejlődő hő ellensúlyozza a gravitációt. Idővel persze kimerül a csillag hidrogén- és egyéb nukleáris üzemanyagkészlete. Paradox módon, minél nagyobb üzemanyag-mennyiséggel rendelkezik a csillag létrejöttekor, annál hamarabb ég ki. Minél nagyobb ugyanis a csillag tömege, annál melegebbnek kell lennie, hogy ellensúlyozza a gravitációs vonzást. S minél forróbb, annál gyorsabban használja fel üzemanyagkészleteit. A mi Napunk még mintegy ötmilliárd évre elegendő nukleáris tüzelőanyaggal rendelkezik, a nagyobb tömegű csillagok azonban akár szerény százmillió év alatt is végezhetnek a magukéval, s ez az idő lényegesen kevesebb a világegyetem koránál. Ha a csillag üzemanyaga fogytán van, hűlni kezd és összehúzódik. Csak a 20-as évek felé kezdtük megismerni, hogy ekkor mi történhet.

1928-ban Subrahmanyan Chandrasekhar, végzős indiai egyetemista útnak eredt, hogy az angliai Cambridge-ben folytassa tanulmányait Sir Arthur Eddington vezetésével. A brit csillagász az általános relativitáselmélet szakértője volt. (A korabeli adoma szerint egy újságíró megemlítette Eddingtonnak, hogy tudomása szerint a világon mindössze hárman értik az általános relativitáselméletet. Eddington elgondolkodott, majd így felelt: - Azon tűnődöm, ki lehet a harmadik.) Anglia felé utazva Chandrasekhar kiszámította, mekkora lehet a csillag, ha még tartja

magát a gravitációval szemben, de nukleáris fűtőanyagát már elhasználta. Úgy gondolta, hogy amikor a csillag összezsugorodik, az anyagrészecskék nagyon közel kerülnek egymáshoz, a Pauli-elv értelmében tehát sebességükben hatalmas különbségek mutatkoznak. Emiatt távolodni kezdenek egymástól, így a csillag ismét tágulni fog, sugara újra állandó lesz; ezúttal a tömegvonzás, illetve a kizárási elv következtében fellépő taszítás biztosítja az egyensúlyt, ahogy korábban a gravitáció és a hő tették. Chandrasekhar azonban azt is felismerte, hogy a kizárási elv által biztosított taszítóerő nem határtalan. A relativitáselmélet következtében a csillag részecskéi legfeljebb a fénysebességet érhetik el. Ha tehát a csillag elég sűrűvé válik, a kizárási elv okozta taszítás már nem tudja leküzdeni a gravitációt. Chandrasekhar számításai szerint a Nap tömegénél másfélszer nagyobb hideg csillag már nem képes fenntartani magát saját gravitációjával szemben. (Ezt a határértéket nevezik ma Chandrasekhar-határnak.) Hasonló eredményre jutott ugyanebben az időben az orosz Lev Oavidovics Landau is.

Mindez roppant súlyos következményekkel jár a nagy tömegű csillagok végzete szempontjából. A Chandrasekhar-határ alatti tömegű csillagok zsugorodása megszűnhet. A csillag végleges méretet ér el, néhány ezer kilométeres átmérőjű fehér törpévé válik, anyagának sűrűsége azonban több százezer kg/cm3 is lehet. A fehér törpét az anyagában lévő elektronokra vonatkozó kizárási elv okozta taszítás menti meg a gravitációs összeomlástól. Nagyszámú fehér törpét tartunk megfigyelés alatt. A Szíriusz, az éjszakai égbolt legfényesebb csillaga körül kering a legelőször fölfedezettek egyike. Landau rámutatott, hogy a csillagok számára más végső állapot is elképzelhető; határtömegük ez esetben is egy-kétszeres a Nap tömegének, de térfogatuk még a fehér törpéénél is sokkal kisebb. Az ilyen csillagokat nem az elektronok, hanem a neutronok és protonok közti kizárási elvből következő taszítás stabilizálja. Ezért a neutroncsillag elnevezést kapták. Sugaruk alig tíz-húsz kilométer, sűrűségük viszont százmilliárd kg/cm3. Amikor Landau megjósolta létezésüket, semmiféle módon sem lehetett még megfigyelni őket. Hosszú ideig nem is került még sor erre.

Ami viszont a Chandrasekhar-határnál nagyobb tömegű csillagokat illeti: ezeknek súlyos gondokkal kell szembenézniük üzemanyaguk elhasználása után. Egyes esetekben felrobbannak, vagy elég anyagot löknek le magukról ahhoz, hogy a tömeghatár alá jutva elkerülhessék a gravitációs összeroppanást. Mégis, nehezen hihető, hogy ez kivétel nélkül minden esetben bekövetkezik, akármilyen nagy is a csillag. Honnan "tudná", hogy le kell adnia súlyfölöslegét?

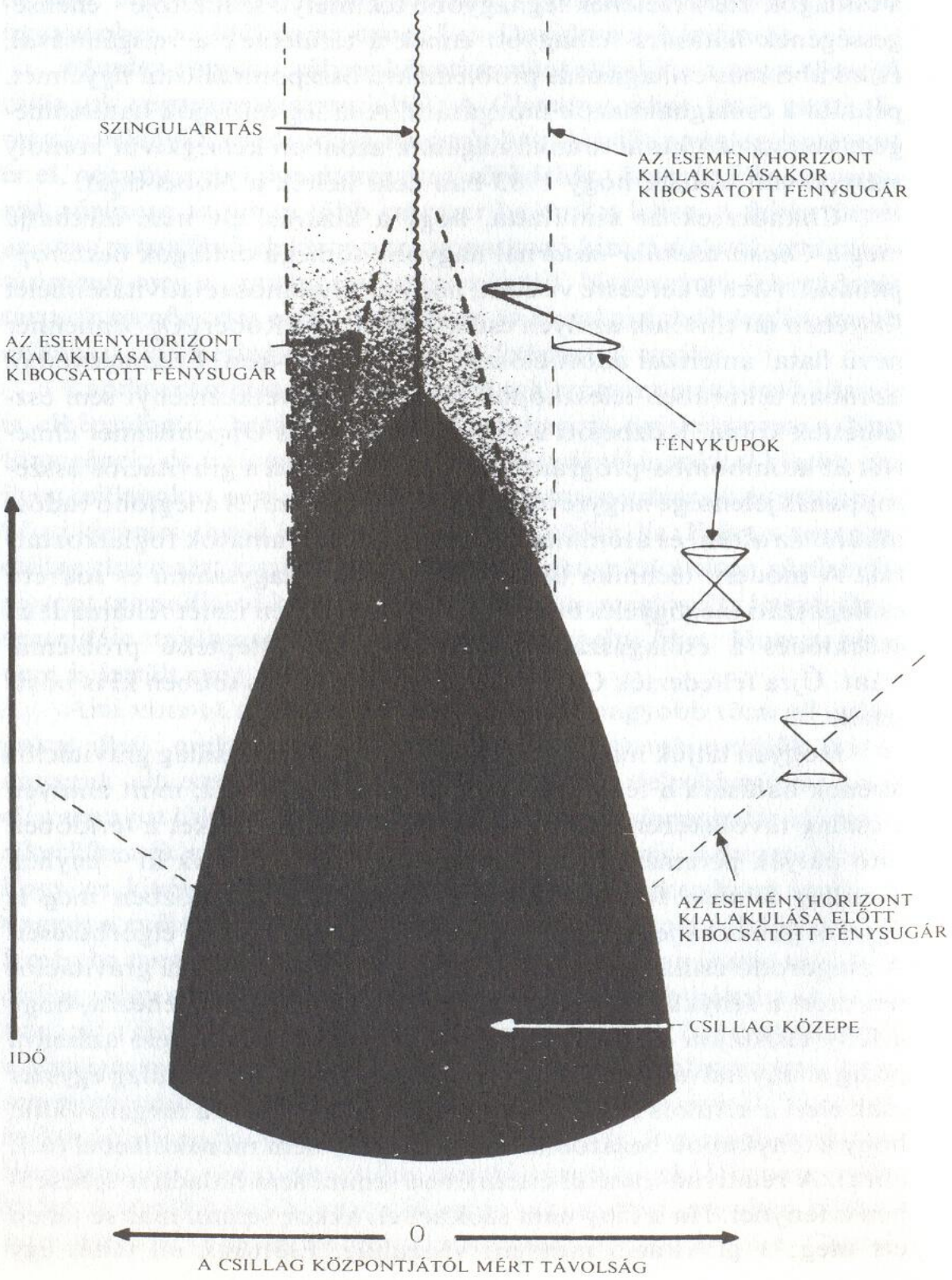
S még ha meg is szabadulhatna anyagfölöslegétől az összes túlsúlyos csillag, s így elkerülnék az összeroppanást, mi történnék, ha anyagot adnánk a fehér törpéhez vagy a neutroncsillaghoz, és átbillentenénk a tömeghatáron? Végtelen sűrűségűvé roppanna? Eddington teljesen megrendült ennek a következménynek a lehetőségétől. Nem volt hajlandó elfogadni Chandrasekhar eredményét. Egyszerűen lehetetlennek tartotta, hogy egy csillag ponttá zsugorodjék. Ugyanígy vélekedett a legtöbb tudós; maga Einstein cikket is írt, melyben kijelentette, hogy a csillagok nem zsugorodhatnak zérus méretűre. Chandrasekhar a többi tudós - mindenekelőtt Eddington, volt tanára és a csillagok szerkezetének legnagyobb tekintélyű szakértője - ellenségességének hatására felhagyott ennek a területnek a vizsgálatával, és inkább más csillagászati problémákra összpontosította figyelmét, például a csillaghalmazok mozgására. A hideg csillagok határtömegére vonatkozó korai munkásságának azonban kétségkívül komoly szerepe volt abban, hogy 1983-ban neki ítélték a Nobel-díjat. Chandrasekhar kimutatta, hogy a kizárási elv nem állíthatja meg a Chandrasekhar-határnál nagyobb tömegű csillagok összeroppanását. Arra a kérdésre viszont, hogy az általános relativitáselmélet fényében mi történik az ilyen csillagokkal, egy Robert Oppenheimer nevű fiatal amerikai adott először választ 1939-ben. Eredményeiből azonban a korabeli teleszkópok semmiféle következményt sem észlelhettek volna. Közbejött a II. világháború, és Oppenheimer elmerült az atombomba-programban. A háború után a gravitációs összeroppanás jelensége nagyrészt háttérbe szorult, mivel a legtöbb tudóst inkább az atomi és atommagskálán lezajló folyamatok foglalkoztatták. A modern technika bevetésével szerzett nagyszámú és sokrétű csillagászati megfigyelés hatására a 60-as években ismét feltámadt az érdeklődés a csillagászat és kozmológia nagyléptékű problémái iránt. Újra felfedezték Oppenheimer munkáját, és többen ki is bővítették.

Hogyan látjuk ma Oppenheimer elméletét? A csillag gravitációs terének hatására a fény pályája a

téridőben más lesz, mint amilyen a csillag távollétében lett volna. A fénykúpok - amiket a téridőben futó pályák pereméről kiinduló fénysugarak rajzolnak ki - enyhén a csillag felülete felé görbülnek. Napfogyatkozás közben meg is figyelhetjük ezt a jelenséget: a távoli csillagok fényének elgörbülését.

A zsugorodó csillag felszíne mentén mind erősebb lesz a gravitációs tér, ezért a fénykúp egyre beljebb hajlik. Mindez megnehezíti, hogy a fény elszökjön a csillag felszínéről, a távoli megfigyelő számára pedig a fény halványabbnak és vörösebbnek látszik. A csillag egyszer csak eléri a kritikus sugarat. A gravitációs tér annyira megerősödik, hogy a fénykúpok bezáródnak, és több fény nem menekülhet el (6.1. ábra). A relativitáselmélet értelmében semmi sem haladhat sebesebben a fénynél. Ha a fény nem szökhet el, akkor semmi más se teheti ezt meg; a gravitáció mindent visszahúz. Előttünk áll tehát egy

6.1 ÁBRA



eseményhalmaz, a téridő egy tartománya, ahonnan semmi sem érheti el a távoli megfigyelőt. Ezt a tartományt nevezzük fekete lyuknak.

Határfelülete, az eseményhorizont, egybeesik azoknak a fénysugaraknak a pályájával, amelyek éppen nem tudnak kiszökni a fekete lyukból. Ha meg akarjuk érteni a látottakat, miközben egy

csillag összeomlását és a fekete lyuk kialakulását figyeljük, emlékeznünk kell rá, hogy a relativitáselméletben nincs abszolút idő. Minden megfigyelő számára más mérték szerint múlik az idő. A csillag gravitációs tere hatására a felszínen tartózkodó személy számára másként telik az idő, mint az űrbeli megfigyelő számára.

Tegyük fel, hogy egy rettenthetetlen űrhajós a vele együtt éppen összeroppanó csillag felszínéről, saját órájának jelzése alapján másodpercenként jeleket küld a csillag körül keringő űrhajónak. Az órája mutasson mondjuk 11:00 órát akkor, amikor a zsugorodó csillag sugara eléri a kritikus értéket: a gravitációs tér annyira megerősödik, hogy semmi se hagyhatja el a felszínt. Az űrhajós jelei ettől kezdve nem érik el az űrhajót. 11:00 felé közeledve, az űrhajón figyelő társak egyre növekvő időközöket mérnének két egymást követő jel megérkezése között. Ez a hatás egészen 10:59:59-ig nagyon gyenge maradna. Az űrhajós 10:59:58-asjelzése után alig több, mint egy másodpercet kellene várnunk a 10:59:59-es jelre, viszont a világ végezetéig várhatnák a 11:00-s jelet. Az űrhajós órája szerint 10:59:59 és 11:00 között a csillag felszínéről kibocsátott sugarak az űrhajóból szemlélve végtelen időtartamon terülnek szét. Az űrhajót egymás után elérő fényhullámok között mind hosszabb idő telik el, ezért a csillag fénye egyre vörösödik és halványodik. Végül a csillag annyira elhalványul, hogy többé nem is látható az űrhajóról; mindössze egy fekete lyuk marad belőle az űrben. A csillag gravitációs ereje azonban nem változik, az űrhajó tehát továbbra is ugyanazon a pályán kering.

E forgatókönyv nem teljesen reális. A csillagtól távolodva a gravitáció gyengül, ezért rettenthetetlen űrhajósunk lábait mindig nagyobb erővel terhelné, mint a fejét. Ez az erőkülönbség vagy spagettivé nyújtaná a hős űrhajóst, vagy egyszerűen széttépné, mielőtt még a csillag elérhetné az eseményhorizont kialakulásához szükséges kritikus sugarat! Úgy véljük azonban, hogy az univerzumban sokkal nagyobb testek is akadnak, például a galaxisok központi tartományai, melyek szintén áldozatául eshetnek a gravitációs összeroppanásnak; az ezek felületére merészkedő űrhajóst nem tépné szét a tömegvonzás, mielőtt az eseményhorizont kialakul. Sőt, mi több, semmi különöset sem észlelne az eseményhorizont kialakulása közben, és észrevétlenül hatolna át a sohavisszanem-térés pontján. Alig néhány órán belül viszont, ahogy a tartomány tovább zsugorodik, megnőne a fejére és lábára ható gravitációs erő különbsége, és csakhamar ez is széttépné.

Roger Penrose és jómagam 1965 és 1970 között végzett kutatásaink során megmutattuk, hogy az általános relativitáselmélet értelmében végtelen sűrűségű és téridő-görbületű szingularitásnak kell létrejönnie a fekete lyukban. Olyan ez, mint a Nagy Bumm az idő kezdetén, csak éppen az összeroppanó test és az űrhajós számára az idő végét jelentené. Ebben a szingularitásban is érvénytelenné válnak a fizikai törvények, és minden előrejelzésünk csődöt mondana. A fekete lyukon kívül maradó megfigyelőt azonban nem érinti az előrejelzés képességének kudarca, mivel sem fény, sem más jelzés nem érheti őt el a szingularitásból. Ez a figyelemreméltó tény késztette Roger Penrose-t a kozmikus cenzúra elméletének felállítására, amelyet így is fogalmazhatnánk: "Isten irtózik a leplezetlen szingularitástól". Más szavakkal, a gravitációs összeroppanás okozta szingularitások csak olyan helyeken jönnek létre - például a fekete lyukakban -, ahol a külső megfigyelő elől illedelmesen elrejtőzhetnek eseményhorizontjuk mögé. Szorosabb értelemben ez a gyenge kozmikus cenzúra elmélete: megvédi a fekete lyukon kívüli megfigyelőt az előrejelzés lehetőségének a szingularitás okozta megszűntétől, de semmit nem tesz a szegény, szerencsétlen űrhajósért, aki valahogy beleesett a lyukba.

Az általános relativitáselmélet egyenleteinek némely megoldása szerint elképzelhető, hogy űrhajósunk saját szemével lássa a leplezetlen szingularitást: nem kell szükségképpen ütköznie vele és beleesnie, áthaladhat egy "hernyójáraton" is, ekkor a világegyetem másik részén fog kilyukadni. Mindez óriási lehetőségeket kínálhatna a térben és időben teendő utazásokhoz. Ezek a megoldások azonban sajnos rettenetesen instabilnak látszanak: a legkisebb zavar - még az űrhajós jelenléte is - megváltoztathatja őket, akkor pedig az űrhajós mindaddig nem látja a fekete lyukat, amíg össze nem ütközik vele és véget nem ér az ideje. Más szavakkal: a szingularitás mindig a jövőjében lesz, sose a múltjában. A kozmikus cenzúra hipotézisének erős változata azt állítja, hogy valószerű helyzetekben a szingularitások vagy teljes egészükben a jövőben fekszenek (mint a gravitációs

összeroppanás szingularitásai), vagy pedig teljes egészükben a múltban (mint a Nagy Bumm szingularitása). Erősen reméljük, hogy a cenzúraelmélet valamelyik változata helytálló, mert a meztelen szingularitások közelében esetleg lehetséges a múltba tett utazás is. Ez kapóra jönne a tudományos fantasztikumnak, az életünk viszont soha többé nem lenne biztonságban: akárki visszamehetne a múltba, és még a fogantatásunk előtt megölhetné apánkat vagy anyánkat!

Az eseményhorizont - a téridő-tartomány határfelülete, ahonnan semmi se szökhet el - féligáteresztő hártya módjára viselkedik a fekete lyuk körül: a tárgyak, például az űrhajós, beleeshetnek a fekete lyukba az eseményhorizonton át, de soha semmi se teheti meg az utat visszafelé. (Ne feledjük, hogy az eseményhorizont a fekete lyukból elmenekülni próbáló fény pályája a téridőben, a fénynél pedig semmi se haladhat gyorsabban.) Az eseményhorizonttal kapcsolatban teljes joggal mondhatjuk ugyanazt, amit Dante mondott a Pokol kapujáról: "Ki itt belépsz, hagyj fel minden reménnyel." Bárki és bármi zuhan át az eseményhorizonton, villámgyorsan eléri a végtelen sűrűségnek és az idő végezetének tartományát. Az általános relativitáselmélet szerint nehéz testek mozgásuk közben gravitációs hullámokat bocsátanak ki, amelyek a tér görbületének fodrozódásaként, a fény sebességévei haladnak. A gravitációs hullám sok szempontból hasonlít a fényhullámhoz, amit az elektromágneses tér fodrozódásának tekinthetünk. Kimutatása viszont sokkal nehezebb. A fényhez hasonlóan magával viszi az öt kibocsátó test energiáját. Az ember ezért arra számítana, hogy súlyos testek rendszerei előbb-utóbb állandósult állapotot érnének el, mivel a mozgással kapcsolatos energiát hamarosan elhordják a gravitációs hullámok. (Olyan ez, mint amikor vízbe parafa dugót pottyantunk : a dugó kezdetben buzgón fel-le bukdácsol, de a víz hullámai elszállítják energiáját, úgyhogy végül megnyugszik, állandósult állapotot vesz fel.) Például a Föld gravitációs hullámokat bocsát ki, miközben a Nap körüli pályán halad. Az ezzel járó energiaveszteség eredményeképpen a pálya megváltozik, a Föld fokozatosan közelebb kerül a Naphoz, végül beleütközik és ezzel eléri az állandósult állapotot.

A Nap és a Föld esetében az energiavesztés mértéke elég szerény, alig tudna működtetni egy kisebbfajta villanykályhát. Az összeütközésig még mintegy ezer millió millió millió millió év (huszonhét nulla az 1 után) telik el, nincs hát okunk a heveny aggodalomra. A Föld túl lassan változtatja a pályáját, ezért ezt nem tudjuk megfigyelni. Sikerült azonban észlelni ugyanezt a jelenséget a PSR 1913+ 16 esetében (a PSR pulzárt jelent, a neutroncsillag egy különleges típusát, amely szabályos rádióimpulzusokat sugároz). Ez a rendszer két neutroncsillagból áll, amelyek egymás körül keringenek, s gravitációs hullámaikkal szétsugárzott energiaveszteségük miatt spirális pályán haladnak egymás felé. Egy csillag gravitációs összeomlása, a fekete lyuk kialakulása közben a mozgások sokkal gyorsabbak, ezért az energiaveszteség mértéke is nagyobb. A csillag tehát viszonylag rövid időn belül állandósult állapotba kerül. Vajon hogy fest a fekete lyuk ebben a végső szakaszban? Az ember azt hinné, hogy ez az eredeti csillag összes vonásától függ: nem csak a tömegétől és forgási sebességétől, hanem különböző részeinek sűrűségétől, a belsejét alkotó gázok változatos mozgásaitól is. Márpedig, ha a fekete lyukak ugyanolyan változatosak, mint az őket létrehozó testek voltak összeroppanásuk előtt, akkor fölöttébb nehezen mondhatnánk róluk bármi általánosat.

1967-ben azonban egy Werner Israel nevű kanadai tudós, aki Berlinben született, Dél-Afrikában nevelkedett és Írországban szerzett doktori címet, forradalmasította a fekete lyukak tudományát. Israel kimutatta, hogy az általános relativitáselmélet szerint a nem forgó fekete lyukak szükségszerűen nagyon egyszerűek: tökéletesen gömbölyűek, méretük csak a tömegüktől függ, és bármely két ilyenfajta, azonos tömegű fekete lyuk egyforma. Sőt, Einstein egyenleteinek egy már 1917-ben felismert partikuláris megoldásával leírhatók - a megoldásra Karl Schwarzchild röviddel az általános relativitáselmélet felfedezése után talált rá. Kezdetben Israellel együtt többen úgy vélték, hogy mivel a fekete lyukaknak tökéletesen gömbölyűeknek kell lenniük, csak tökéletesen gömbölyű test összeroppanása révén keletkezhetnek. A valódi csillagok - amelyek természetesen sohasem tökéletesen gömbölyűek - tehát csak meztelen szingularitássá zsugorodhatnak.

Israel eredményének azonban más értelmezése is létezett, ezt Roger Penrose és John Wheeler támogatta elsősorban. Érvelésük szerint a csillag összeomlásával kapcsolatos gyors mozgások miatt

a kibocsátott gravitációs hullámok a folytonos gömbölyödésnek kedveznek, mire tehát a csillag állandósult állapotba kerül, tökéletesen gömbölyű lesz. E nézet szerint bármilyen bonyolult a nem forgó csillag alakja és belső szerkezete, a gravitációs összeomlás végén tökéletesen gömbölyű fekete lyuk lesz belőle, aminek a méretét csak a tömege határozza meg. További számítások is alátámasztották ezt a feltevést, így hamarosan ez vált általánosan elfogadottá.

Israel eredménye kizárólag a nem forgó testekből létrejött fekete lyukakra vonatkozott. 1963-ban az új-zélandi Roy Kerr az általános relativitáselmélet egyenleteinek olyan megoldáscsoportjára bukkant, amelyek a forgó fekete lyukakat írják le. Ezek a "Kerr"-típusú fekete lyukak állandó sebességgel forognak, méretük és alakjuk tömegüktől és fordulatszámuktól függ. Zérus fordulatnál a fekete lyuk teljesen gömbölyű és a megoldás egybeesik a Schwarzchild-megoldással. Ha a fordulatszám nem nulla, a fekete lyuk az egyenlítője mentén kiduzzad (akárcsak a Föld vagy a Nap), mégpedig annál nagyobb mértékben, minél gyorsabb a forgás. Avégett tehát, hogy Israel eredményét a forgó testekre is kiterjeszthessék, feltételezték, hogy bármely forgó test, mely fekete lyukká alakul, végső soron a Kerr-megoldás által leírt állandósult állapotot veszi fel. 1970-ben cambridge-i kollégám és kutató-ösztöndíjas diáktársam, Brandon Carter megtette az első lépést e feltevés jogosságának igazolása felé. Kimutatta, hogy amennyiben a forgó fekete lyuknak szimmetriatengelye van, mint például egy pörgő búgócsigának, akkor mérete és alakja csak tömegétől és fordulatszámától függ.

197I-ben bebizonyítottam, hogy bármely állandó sebességgel forgó fekete lyuknak tényleg van ilyen szimmetria tengelye. Végül 1973-ban, Carter eredményeire és az enyéimre támaszkodva, a londoni Kings College kutatója, David Robinson megmutatta, hogy a feltételezés jogos volt: az ilyen fekete lyukra valóban érvényes a Kerr-megoldás. A gravitációs összeomlást követően tehát a fekete lyuknak olyan állapotot kell felvennie, amelyben foroghat, de nem pulzálhat. Alakja és mérete kizárólag tömegétől és fordulatszámától függ, viszont független annak a testnek a természetétől, amelyből létrejött. Ezt az eredményt az alábbi szállóige alapján emlegetik: "A fekete lyuk szőrtelen ". A szőrtelenségi tétel gyakorlati fontossága óriási, mivel hallatlanul leszűkíti a fekete lyukak potenciális típusait.

Ez teszi lehetővé, hogy részletes modelleket készítsünk, amelyek fekete lyukakra is kiterjednek, és aztán egybevessük jóslataikat a megfigyelésekkel. A tétel emellett azt is jelenti, hogy a fekete lyuk létrejötte során az összeroppanó testre vonatkozó hallatlan mennyiségű információ elvész, mivel a folyamat befejeztével csak a fekete lyuk tömegét és fordulatszámát mérhetjük meg. Ennek jelentőségét a következő fejezetben tárgyaljuk.

A fekete lyukak a tudomány történetének ama ritka példái közé tartozna, amelyek esetében a helyes elméletet részletes matematikai modell formájában dolgozták ki, bármiféle kísérleti bizonyíték nélkül. Éppen ez szolgált a fekete lyukak ellenzői számára legfontosabb érvként: hogy hihetnénk olyan objektumokban, amelyek létezését mindössze a fölöttébb kétséges általános relativitáselméleten nyugvó számítások támasztják alá?

1963-ban azonban Marteen Schmidt, a kaliforniai Palomar Obszervatórium csillagásza megmérte a 3C273 jelzésű rádióhullámforrás (azaz a harmadik cambridge-i rádióhullám-katalógus 273. sorszámú forrása) irányában található, halvány, csillagszerű test vöröseltolódását. Úgy találta, hogy ekkora vöröseltolódást nem okozhat a gravitációs mező; ha mégis az okozná, az objektum olyan hatalmas tömegű lenne és annyira közel lenne hozzánk, hogy megzavarná a Naprendszer bolygóinak pályáját. A vöröseltolódást tehát a világegyetem tágulása okozza, ami viszont azt jelenti, hogy az égitest roppant messze van. S hogy ilyen távolságból is látható legyen a fénye, óriási fényerővel kell világítania, azaz hatalmas energiamennyiséget kibocsátania. S a tudósok mindössze egy folyamatot tudtak elképzelni, ami ekkora energiafelszabadulással jár: nem is egy csillag, de egy egész galaxis teljes központi tartományának gravitációs összeroppanását. Számos hasonló csillagszerű objektumot, szaknyelven kvazárt (angolul quasi-stellar object, azaz quasar) fedeztek fel azóta, mindegyiknek hatalmas a vöröseltolódása.

6.2 ÁBRA

A FOTÓ KÖZEPE TÁJÁN A KÉT CSILLAG FÉNYESEBBIKE A CYGNUS X-1, A FELTEVÉSEK SZERINT EGYMÁS KÖRÜL KERINGŐ FEKETE LYUKBÓL ÉS NORMÁLIS CSILLAGBÓL ÁLL

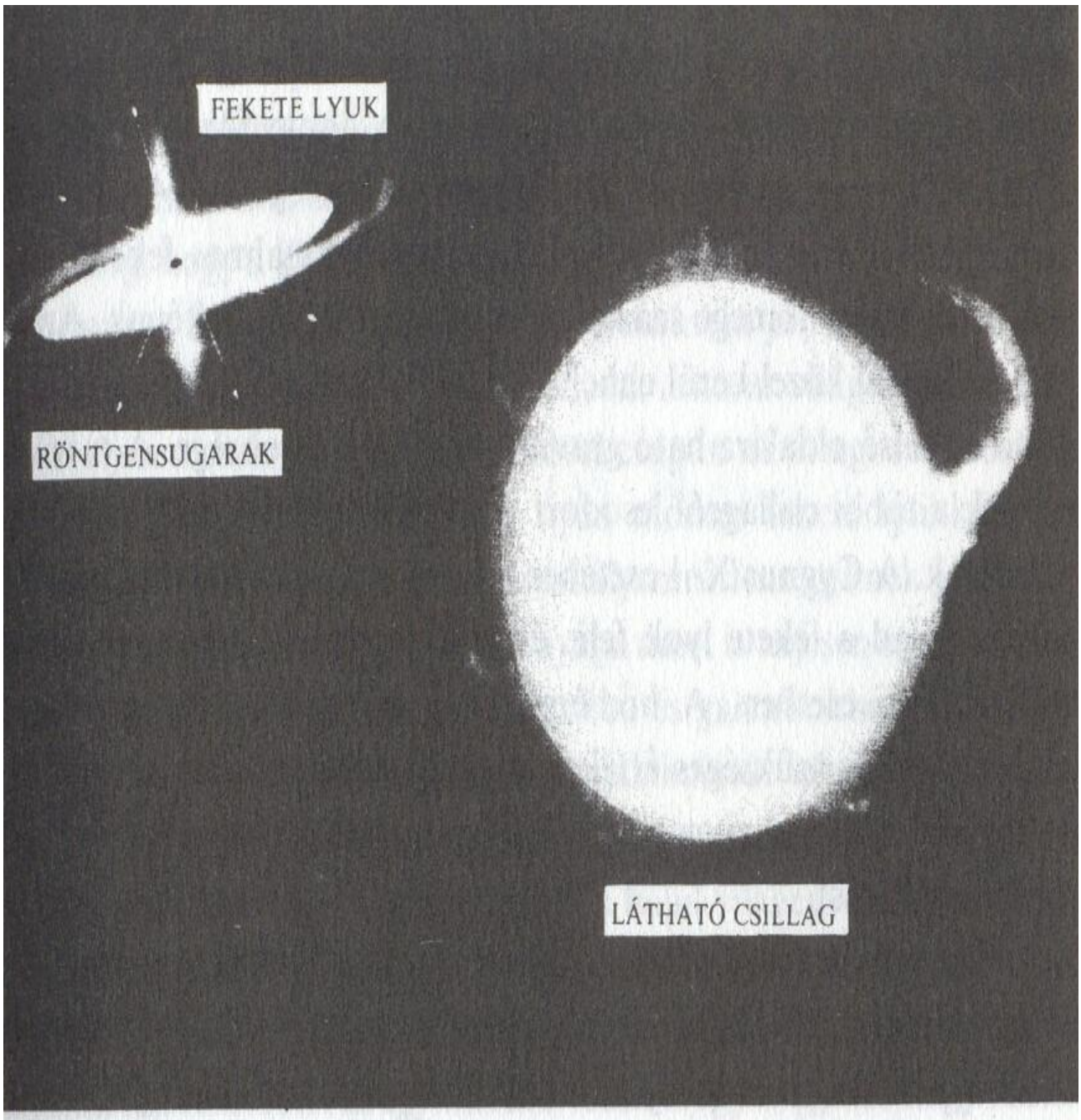
Az óriási távolság miatt azonban megfigyelésük túl nehéz, s így nem szolgáltathatnak cáfolhatatlan bizonyítékot a fekete lyukakról.

1967-ben újabb eredmények támasztották alá a fekete lyukak létezésébe vetett hitet. Jocelyn Bell, cambridge-i kutató-ösztöndíjas diák olyan égitesteket fedezett fel, amelyek szabályos rádióhullámimpulzusokat küldtek. Eleinte Bell - és témavezetője, Antony Hewish - azt hitte, hogy a galaxis valamely idegen civilizációjával teremtettek kapcsolatot! Emlékszem rá, hogy amikor szemináriumukon közzétették felfedezésüket, az elsö négy forrást LGM 1-4 névvel illették: LGM annyi, mint Littie Green Men (kis zöld emberkék). Végül azonban ők és mindenki más is arra a sokkal prózaibb következtetésre jutottak, hogy ezek az égitestek - a pulzárok valójában forgó neutroncsillagok, és azért bocsátanak ki rádióhullám-impulzusokat. mert mágneses terük bonyolult kölcsönhatásban van a környezö anyaggal. A kozmikus westernek szerzőit ez lesújtotta. annál nagyszerűbb hír volt viszont a magunkfajta kevesek számára, akik akkoriban is hittünk a fekete lyukakban: ez volt a neutroncsillagok létezésének első pozitív bizonyítéka. A neutroncsillag sugara mintegy tizenhat kilométer, már csak alig néhányszor nagyobb annál a kritikus sugárnál, amelynél a csillag fekete lyukká válik. Ha egy csillag ilyen kicsire tud zsugorodni, akkor nem ésszerűtlen a feltételezés, hogy mások még kisebb méretűre zsugorodnak és fekete lyukká válnak. Hogy mutatható ki egy fekete lyuk, ha egyszer az már a definíciója szerint se bocsáthat ki fényt? A dolog némileg emlékeztet a sötét szenespincében kergetett fekete macska esetére. Szerencsére van megoldás. Ahogy John Michell rámutatott l783-ban írt úttörő munkájában, a fekete lyuk gravitációs ereje továbbra is befolyásolja a közeli égitesteket. A csillagászok több rendszert is megfigyeltek, amelyekben két csillag egymás körül kering, kölcsönös gravitációjuk hatására. Olyan rendszereket

is megfigyeltek azonban, amelyekben csak egy látható csillag kering valamely láthatatlan társ körül. Persze nem vonhatjuk mindjárt le a következtetést, hogy a társ nyilván egy fekete lyuk; lehet, hogy a csillag fénye túl halvány, és ezért nem látjuk. Egynémely ilyen rendszer, például a 6.2. ábrán bemutatott Cygnus X-I ugyanakkor erőteljes röntgensugárforrás is. E jelenség legjobb magyarázata az, hogy anyag szakad le a látható csillag felszínéről. Amint ez tovább zuhan a láthatatlan társcsillag felé, spirális mozgást végez (mint a fürdőkádból leeresztett víz), nagyon forróvá válik, miközben röntgensugarakat bocsát ki (6.3. ábra).

E mechanizmus működéséhez a láthatatlan égitestnek nagyon kicsinek: fehér törpének, neutroncsillagnak - vagy fekete lyuknak kell lennie. A látható csillag pályájából meghatározhatjuk a láthatatlan test legkisebb lehetséges tömegét. A Cygnus X-1 esetében ez a Nap tömegének hatszorosa, ami Chandrasekhar eredménye alapján túl nagy ahhoz, hogy a láthatatlan társcsillag fehér törpe legyen. Ahhoz is túl nagy, hogy neutroncsillag legyen. Eszerint tehát más nem lehet, csak fekete lyuk. Olyan modellek is léteznek a Cygnus X-I leírására, amelyek nem tartalmazzák a fekete lyukat, de mindegyik eléggé erőltetett.

A fekete lyuk tűnik a megfigyelések egyetlen igazán természetes magyarázatának. Ennek ellenére fogadást kötöttem Kip Thorne-nal a California Institute of Technology-ról, hogy a Cygnus X-l valójában nem is tartalmaz fekete lyukat! Ezt afféle balesetbiztosításnak



6.3 ÁBRA

tekintem. Rengeteg munkát fektettem a fekete lyukakba, s ez mind kárba vész, ha kiderül, hogy mégse léteznek fekete lyukak. Így legalább meglesz az a vigaszom, hogy megnyerek egy fogadást: négy évi előfizetést a Private Eye (Magándetektív) című folyóiratra.

Ha viszont a fekete lyukak mégis léteznek, Kip egyévi Penthouse előfizetést nyer tőlem. 1975-ben, amikor megkötöttük a fogadást, 80 százalékot adtunk annak a lehetőségnek, hogya Cygnus - fekete lyuk. Ma már 95 százalékot adnék neki, de a fogadás még eldöntetlen.

Több, a Cygnus X-I-hez hasonló rendszer esetében van már bizonyítékunk fekete lyukak létezésére, galaxisunkban is és a szomszédos galaxisban, a Magellán Felhőben. Szinte bizonyos azonban, hogy a fekete lyukak száma ennél sokkal nagyobb: a világegyetem hosszú történetében sok csillag elégethette már üzemanyagát és összeroppanhatott. A fekete lyukak száma egyébként könnyűszerrel

meghaladhatja a látható csillagokét is. Ez a szám egyedül a mi galaxisunkban eléri a százmilliárdot. Az ilyen nagyszámú fekete lyuktól származó extra gravitációs vonzás révén megmagyarázhatnánk, miért forog galaxisunk olyan gyorsan, ahogy forog; a látható csillagok tömege ugyanis ehhez sehogyse volna elegendő. Arra is van némi bizonyítékunk, hogy a galaxis közepén hatalmas fekete lyuk található, ennek tömege százezerszerese lehet a Napunkénak. Amelyik csillag túl közel kerül ehhez a fekete lyukhoz, azt szétszakítja a külső és belső oldalára ható gravitációs erők különbsége. A maradványok a többi csillagról lesodort gázokkal együtt a fekete lyukba zuhannak. A Cygnus X-I esetéhez hasonlóan a gáz szűkülő spirális pályán halad a fekete lyuk felé, és felmelegszik, bár nem annyira, mint a fenti esetben. A hőmérséklet nem éri el a röntgensugár kibocsátásához szükséges értéket, de indokolhatja a galaxis középpontjában észlelt, nagyon nagy sűrűségű rádióhullám- és infravörös sugárzási forrást.

Hasonló, de még ennél is nagyobb fekete lyukakat tételezünk fel a kvazárok középpontjában; ezek tömegét a Nap tömegének százmilliószorosára becsüljük. Csak az ilyen óriási tömegű fekete lyukba hulló anyag biztosíthatná akkora energia felszabadulását, amekkorát ezek az égitestek kibocsátanak. A lyuk felé spirálvonal mentén zuhanó anyag hatására a fekete lyuk ugyanabba az irányba kezd pörögni, ami a Földéhez hasonló mágneses tér kialakulására vezet. A fekete lyukba zuhanó anyag a lyuk közvetlen közelében roppant nagyenergiájú részecskéket hoz létre. A mágneses tér olyan erős, hogy a fekete lyuk forgástengelyének irányába, tehát az északi és déli pólus irányába fókuszálva kilövi ezeket a részecskéket. Ilyen részecskesugarakat számos galaxis és kvazár esetében megfigyeltek.

Elképzelhető, hogy a Napunkénál sokkal kisebb tömegű fekete lyukak is léteznek. Ezeket nem hozhatja létre gravitációs összeroppanás, mivel tömegük messze a Chandrasekhar-határ alatt marad; az ilyen kis tömegű csillagok fenn tudják tartani magukat a gravitációs erővel szemben, még akkor is, amikor már elhasználták nukleáris üzemanyagukat.

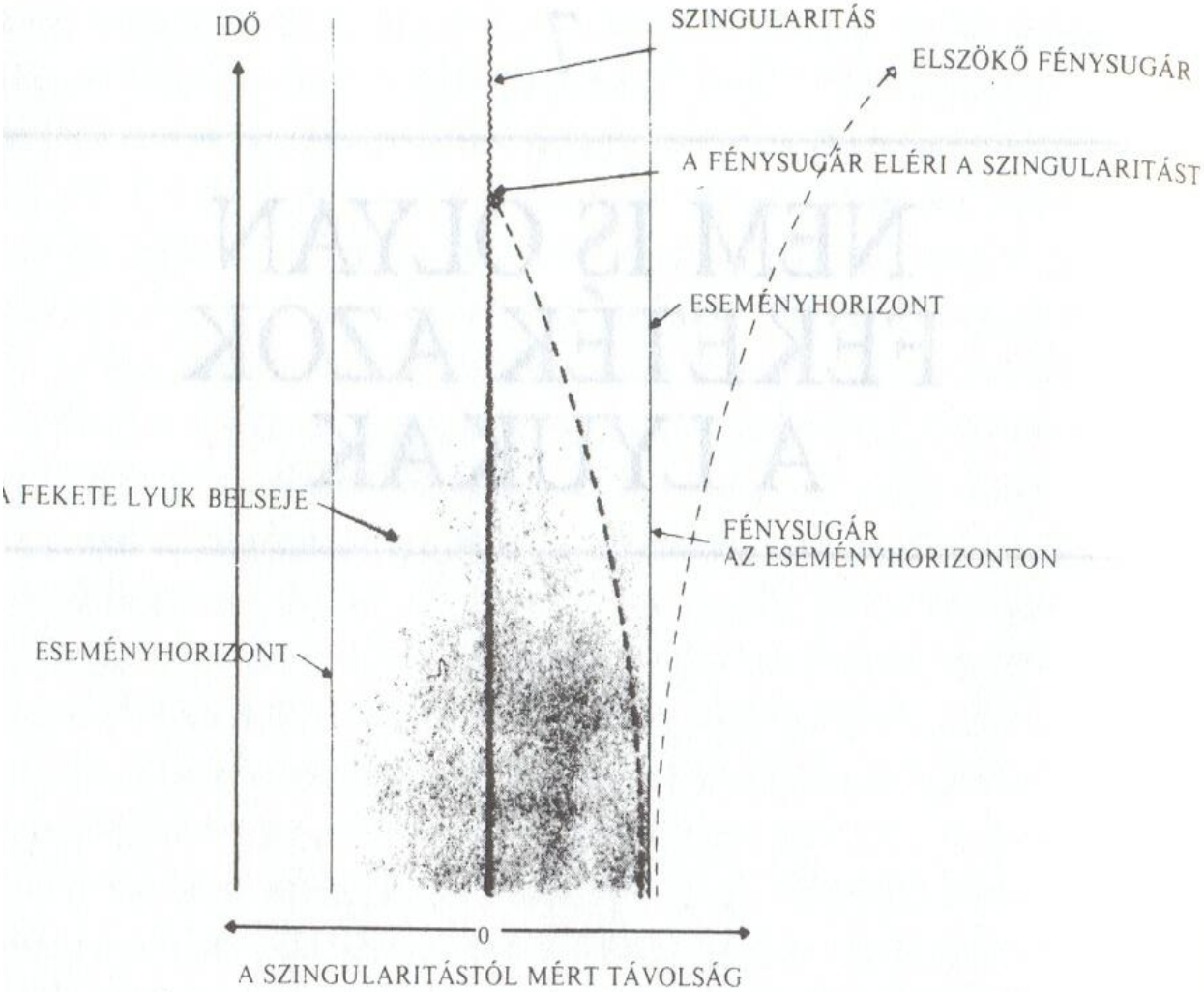
Kis tömegű fekete lyukak csak akkor keletkezhetnek, ha az anyagot igen nagy külső nyomással óriási sűrűségűre préseljük. Ilyen feltételek csak egy hihetetlenül nagy hidrogénbombában jönnek létre; John Wheeler egyszer kiszámította, hogy ha a világ összes óceánjából kivonnánk a nehézvizet és a segítségével egyetlen óriási hidrogénbombát építenénk, ennek a robbanási centrumában annyira összenyomódna az anyag, hogy létrejönne a fekete lyuk. (Persze senki se maradna, aki tanulmányozhatná.) Ennél ésszerűbb az a lehetőség, hogy a kis tömegű fekete lyukak a nagyon fiatal világegyetem magas hőmérsékletein és nagy nyomásain jöhettek létre. Erre azonban csak akkor nyílhatott mód, ha a korai világegyetem nem volt teljesen sima és egyenletes, mivel csupán az átlagosnál sűrűbb kis tartomány nyomható össze ilyen módon fekete lyukká. Azt azonban tudjuk, hogy bizonyos szabályszerűtlenségeknek létezniük kellett, különben a világegyetem anyaga most is teljesen egyenletesen oszlana meg, ahelyett, hogy csillagokba és galaxisokba tömörül.

Vajon a csillagok és galaxisok kialakulását lehetővé tevő szabálytalanságok okozhatták-e számottevő mennyiségű ősi fekete lyuk megjelenését? A válasz egyértelműen a fiatal világegyetemben létező feltételek részleteitől függ. Ha tehát meg tudnánk határozni a ma létező, ősi fekete lyukak számát, sokat megtudnánk a világegyetem kezdeti fejlődéséről. Az egymilliárd tonnát (egy nagyobb hegy tömege) meghaladó tömegű ősi fekete lyukak létezését csak a világűr többi, látható objektumára, avagy a világegyetem tágulására gyakorolt hatásuk révén lehet kimutatni. Amint azonban a következő fejezetben látjuk, a fekete lyukak nem is igazán feketék: forró test módjára világítanak, mégpedig minél kisebbek, annál inkább. Úgyhogy akármennyire paradoxonnak tűnik, a kis fekete lyukakat talán még könnyebb kimutatni, mint a nagyokat!

NEM IS OLYAN FEKETÉK AZOK A LYUKAK

Az általános relativitáselmélettel kapcsolatos kutatómunkám középpontjában 1970 előtt az a kérdés állt, hogy létezett-e valaha Nagy Bumm típusú szingularitás. 1970 novemberében azonban, nem sokkal Lucy lányom születése után, lefekvéshez készülődve a fekete lyukakon kezdtem töprengeni. Betegségem miatt a lefekvés hosszadalmas procedúra, így bőségesen volt időm. Akkoriban még nem született pontos meghatározás arra, hogy a téridő mely pontjai vannak a fekete lyukon belül, és

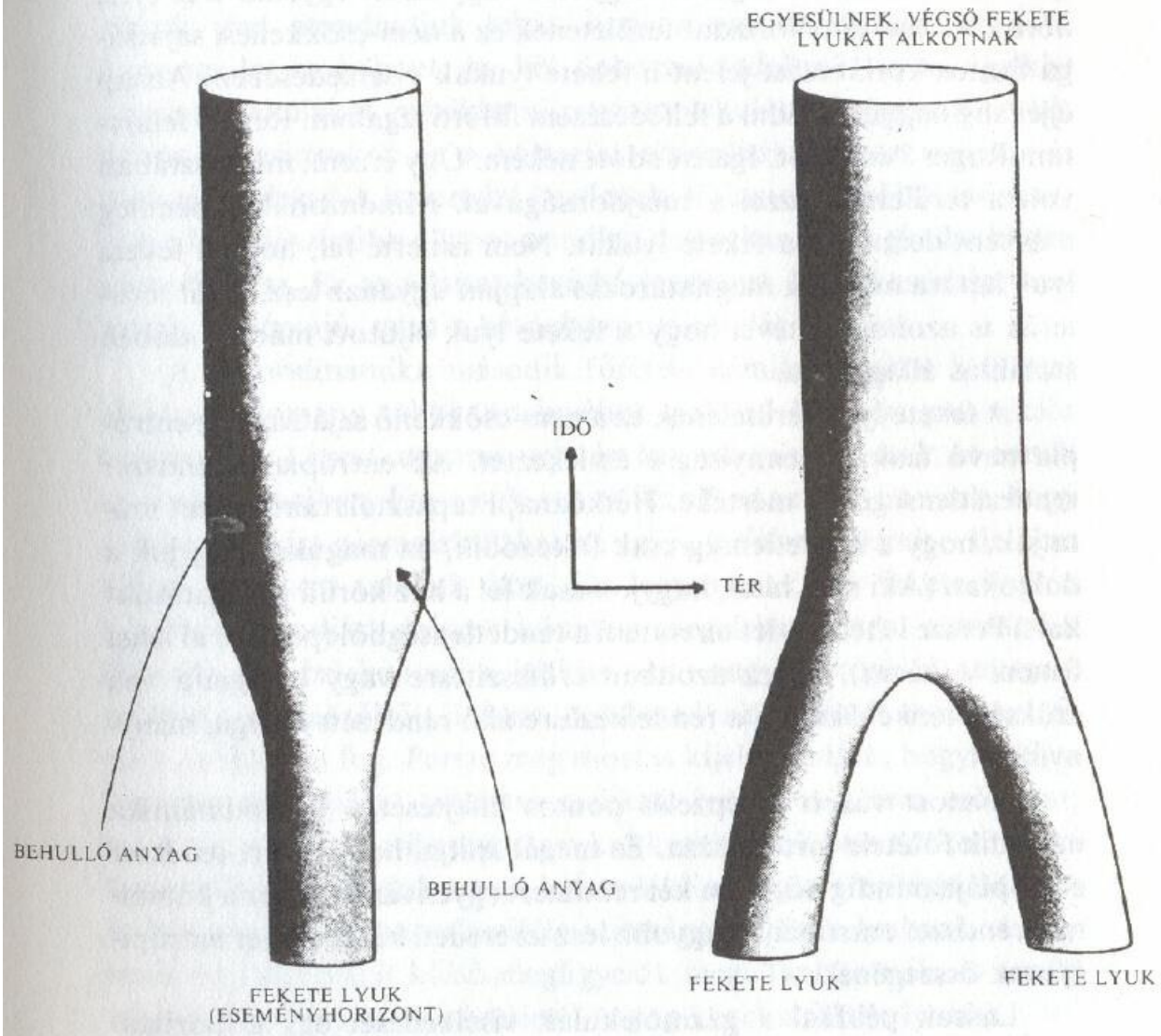
melyek azon kívül. Már megvitattam Roger Penrose-zal a definícióra vonatkozó elképzelésemet: a fekete lyuk olyan események halmaza, amelyektől semmi se szökhet túl messzire. Ez ma az általánosan elfogadott meghatározás. Eszerint a fekete lyuk határát, az eseményhorizontot azoknak a fénysugaraknak a téridőbeli pályái alkotják, amelyek még éppen nem tudnak elszakadni a fekete lyuktól, hanem az elszakadás határán haladnak (7.1. ábra). Olyan ez, mintha a rendőrség elől futtunkban nagy üggyel-bajjal egyetlen lépésnyi előnyt tartanánk, de egérútra sehogyse tehetnénk szert. Hirtelen belém villant: ezeknek a fénysugaraknak a pályái sohase közeledhetnek egymáshoz. Ha megtennék, előbb-utóbb



7.1 ÁBRA

találkozniuk kellene. Az pedig olyan, mintha menekülés közben találkoznánk valakivel, aki az ellenkező irányba fut a rendőrök elől - mindkettőnket elkapnának! (Azaz ebben az esetben belezuhannánk a fekete lyukba.) Ha viszont ezeket a sugarakat elnyeli a fekete lyuk, akkor ők nem alkothatják a lyuk határát. Az eseményhorizontot alkotó fénysugarak tehát mindig egymással párhuzamosan, azonos vagy ellenkező irányba haladnak. Másképp megfogalmazva, a fekete lyuk határa, az eseményhorizont olyan, mint az árnyék pereme - a küszöbön álló végzet árnyékáé. Ha elég távoli fényforrás fénye kelti az árnyékot, például a Napé, láthatjuk, hogy a peremen a sugarak nem közelítenek egymáshoz. Az eseményhorizontot, tehát a fekete lyuk határát alkotó fénysugarak sosem közelíthetnek egymáshoz. Akkor viszont az eseményhorizont területe növekedhet vagy változatlan maradhat, de nem csökkenhet - ez ugyanis azt jelentené, hogy legalábbis a fénysugarak egy része egymás felé közeledett.

Valójában a területnek mindannyiszor növekednie kell,



7.3 ÁBRA

valahányszor anyag vagy sugárzás hullik a fekete lyukba (7.2. ábra). Ha pedig két fekete lyuk összeütközik és egyetlen lyukat hoz létre, akkor az eredő lyuk eseményhorizontjának a területe a két eredeti fekete lyuk területének összegénél nagyobb vagy azzal egyenlő lesz (7.3. ábra). Az eseményhorizont területének ez a nem-csökkenési sajátsága fontos korlátozást jelent a fekete lyukak viselkedésében. Aznap éjjel alig hagyott aludni a felfedezésem fölötti izgalom. Reggel felhívtam Roger Penrose-t. Igazat adott nekem. Úgy érzem, már tisztában volt a területnek ezzel a tulajdonságával. Mindazonáltal némileg másként definiálta a fekete lyukat. Nem ismerte fel, hogy a

fekete lyuk határa mindkét meghatározás alapján ugyanaz lesz, tehát területük is azonos, feltéve, hogy a fekete lyuk eljutott már az időbeli stabilitás állapotába. A fekete lyuk területének ez a nem-csökkenő sajátsága az entrópia nevű fizikai mennyiségre emlékeztet. Az entrópia a rendszer rendezetlenségének mértéke. Hétköznapi tapasztalataink is azt mutatják, hogy a rendetlenség csak fokozódik, ha magukra hagyjuk a dolgokat. (Aki nem hiszi, hagyjon csak fel a ház körüli javítgatásokkal!) Persze lehet rendet teremteni a rendetlenségből (például ki lehet festeni a házat), ehhez azonban erőfeszítésre vagy energiára van szükség, ami csökkenti a rendelkezésre álló rendezett energia mennyiségét.

A most vázolt elképzelés pontos kifejtését a termodinamika második főtétele tartalmazza. Ez megállapítja, hogy a zárt rendszer entrópiája mindig nő, és ha két rendszert egyesítünk, akkor a kombinált rendszer entrópiája nagyobb lesz az eredeti két rendszer entrópiájának összegénél.

Lássuk például a gázmolekulák viselkedését egy dobozban. A molekulákat úgy is elképzelhetjük, mint megannyi pici biliárdgolyót, melyek állandóan egymásnak ütköznek és visszapattannak a falról. Minél magasabb a gáz hőmérséklete, annál gyorsabban mozognak a molekulák, tehát annál gyakrabban és erősebben ütköznek a falnak és ezáltal mind nagyobb nyomást gyakorolnak a falra. Tegyük fel, hogy kezdetben az összes molekulát egy válaszfal segítségével a doboz baloldali térfelébe zártuk. Ha eltávolítjuk a válaszfalat, a molekulák csakhamar a doboz mindkét részét megszállják. Éppenséggel előfordulhat, hogy valamely későbbi időpontban mindannyian a jobb térfélen gyülekeznek, de nyomasztóan nagyobb valószínűséggel lesz a két térfélben nagyjából ugyanannyi molekula. Ez az állapot kevésbé rendezett - azaz rendezetlenebb -, mint a kiindulási állapot volt, ahol az összes molekulát a baloldali rekeszbe zártuk. Azt mondhatjuk tehát, hogy a gáz entrópiája megnőtt.

Ugyanez lesz a helyzet, ha két dobozzal indulunk, és az egyikbe oxigénmolekulákat, másikba nitrogénmolekulákat helyezünk. A két doboz egyesítésekor és a válaszfal eltávolításakor az oxigén- és nitrogénmolekulák keveredni kezdenek. Valamely későbbi időpontban a legvalószínűbb állapot mindkét dobozban a két gáz homogén keveréke lesz. Ez az állapot kevésbé rendezett, következésképp nagyobb entrópiájú, mint a kétdobozos kiindulási állapot.

A termodinamika második főtétele némileg sajátos helyzetet élvez a tudomány többi törvényéhez, például Newton gravitációs törvényéhez képest, ugyanis nem érvényesül mindig, csak az esetek igen nagy részében. Egy a sok-sok milliárdhoz az esélye annak, hogy a dobozba zárt gázmolekulákat az egyik térfélen találjuk - de nem kizárt, hogy ott találjuk őket. De legyen csak egy fekete lyuk a közelben, mindjárt egészen könnyen meg lehet sérteni a második főtételt: elég belehajítani a lyukba némi nagy entrópiájú anyagot, például a gázzal töltött dobozt. A fekete lyukon kívüli anyag entrópiája csökkenni fog. Persze még most is kijelenthetjük, hogy a teljes rendszer entrópiája - ideértve a fekete lyukat is - nem csökkent, mivel azonban semmiképpen sem kukkanthatunk bele a fekete lyukba, nem határozhatjuk meg a benne levő anyag entrópiáját. Milyen jó is lenne, ha volna valamiféle sajátsága a fekete lyuknak, amely révén az entrópiáját külső megfigyelők megállapíthatnák, és amely megnő, amikor entrópiahordozó anyag kerül a fekete lyukba.

Követve a fenti felfedezést - amely szerint a fekete lyuk területe megnő, ha anyag hullik a lyukba - egy Jacob Bekenstein nevű kutató-ösztöndíjas princetoni diák felvetette, hogy a terület a fekete lyuk entrópiájának mértéke lenne. Amennyiben anyag jut a lyukba, megnő az eseményhorizont területe, így a fekete lyukon kívüli entrópiának és a horizontok területének összege mindig változatlan.

Ezzel a megoldással a jelek szerint a legtöbb esetben elkerülhető a termodinamika második főtételének megsértése. Van azonban egy végzetes hibája. Ha a fekete lyuknak entrópiája van, akkor lennie kell hőmérsékletének is. Adott hőmérsékletű test pedig meghatározott mértékű sugárzást bocsát ki. Hétköznapi tapasztalat, hogy a tűzben felhevített piszkafa vörösen izzik és sugárzást bocsát ki, de ugyanígy sugároznak az alacsonyabb hőmérsékletű testek is; ez csupán azért nem szembeszökő, mert a sugárzás mértéke általában elég csekély. Erre a sugárzásra a második főtétel megsértésének elkerülése végett van szükség. A fekete lyukaknak tehát sugározniuk kell.

Ugyanakkor azonban a definíció szerint a fekete lyukak semmiféle sugárzást sem bocsáthatnak ki. Úgy tűnik tehát, hogy az eseményhorizont területe nem lehet a fekete lyuk entrópiájának mértéke. 1972-ben írtam is egy cikket Brandon Carterrel és egy amerikai kollégával, Jim Bardeennel együtt; rámutattunk, hogy noha nagyon sok hasonlóság mutatkozik az entrópia és az eseményhorizont között, mégis itt van ez a szemmel láthatóan végzetes ellentmondás. Be kell vallanom, cikkem megírásakor részben a Bekensteinnel szembeni bosszúság is vezérelt, mivel ő, érzésem szerint, visszaélt az eseményhorizont területére vonatkozó felfedezésemmel. A végén azonban kiderült, hogy alapvetően neki volt igaza, bár úgy, ahogy ő maga bizonyosan nem várta volna.

1973 szeptemberében Moszkvába látogattam, és a fekete lyukakról folytattam eszmecserét két vezető szovjet szakértővel, Jakov Zeldoviccsal és Alekszander Sztarobinszkijjel. Sikerült meggyőzniük róla, hogy a kvantummechanikai határozatlansági elv értelmében a forgó fekete lyukaknak részecskéket kell létrehozniuk és kibocsátaniuk. Elfogadtam az érvelésüket megalapozó fizikai képet, de nem tetszett a részecskekibocsátás számításánál alkalmazott matematikai módszer. Nekiláttam hát, hogy jobbat találjak. Eredményeimet 1973 novemberének végén egy nem hivatalos oxfordi szeminárium elé tártam. Akkoriban még nem végeztem el a számításokat, amelyekből kiderült volna, hogy mennyi részecske tényleges kibocsátásáról van szó. Mindössze arra számítottam, hogy megtalálom a forgó fekete lyukak Zeldovics és Sztarobinszkij által megjósolt sugárzást. Képzelhető meglepődésem és bosszúságom, amikor a számításokat végre elvégezve azt találtam, hogy a nem forgó fekete lyukaknak is egyenletes tempóban kell részecskéket létrehozniuk és kibocsátaniuk. Kezdetben úgy véltem, hogy ez az általam választott közelítő módszerek érvénytelenségét jelzi. Féltem, ha Bekenstein értesül eredményeimről, a fekete lyukak entrópiájával kapcsolatos elképzeléseinek további támogatására használja őket. Azokat pedig továbbra se kedveltem. Márpedig minél tovább gondolkodtam a közelitéseim felől, annál megalapozottabbaknak látszottak. A jelenség valódiságáról végül is az győzött meg, hogy a kibocsátott részecskék spektruma pontosan megegyezett egy forró test sugárzásának spektrumával, a mértékük pedig pontosan akkora volt, amekkorával elkerülhető a második főtétel megsértése. A számításokat azóta többen, többféleképpen elvégezték. Az összes eredmény megerősíti, hogy a fekete lyuknak úgy kell részecskéket és sugárzást kibocsátania, mintha meleg test lenne. Hőmérséklete egyedül a fekete lyuk tömegétől függ: minél nagyobb a tömeg, annál alacsonyabb a hőmérséklet.

Hogyan lehetséges az, hogy a fekete lyuk a jelek szerint részecskéket bocsát ki, holott tudjuk, hogy eseményhorizontjának belsejéből semmi se szökhet el? A kvantumelmélet így válaszol: a részecskék nem a fekete lyuk belsejéből, hanem az eseményhorizonton kívüli, "üres" térből származnak! Mi lehet ennek a magyarázata?

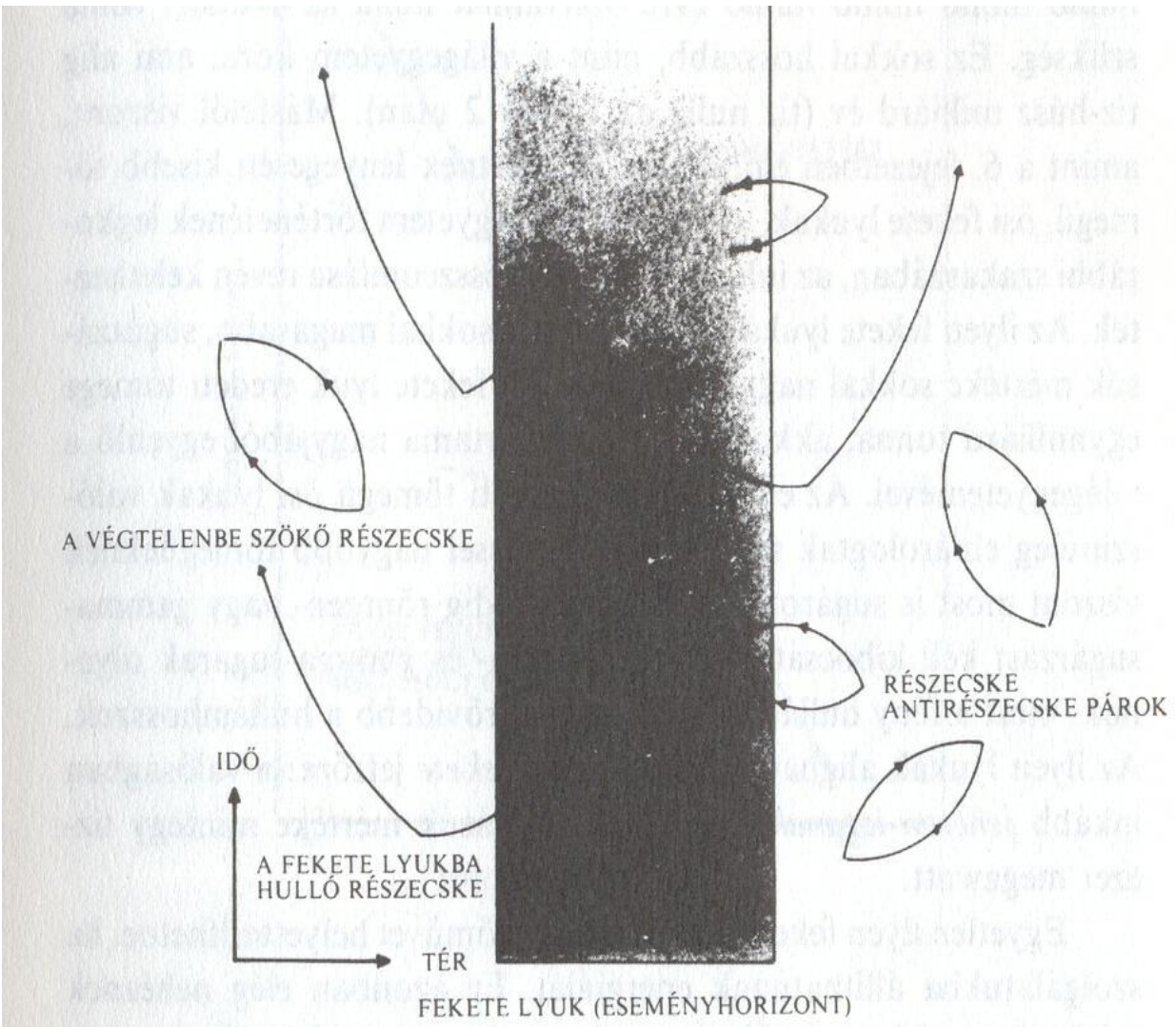
Amit "üres" térnek vélünk, az nem lehet teljesen üres, mivel ez esetben az összes erőtérnek, például a gravitációs és az elektromágneses térnek is, pontosan nullának kéne lennie. A tér erőssége és ennek időbeli változása azonban olyanok, mint a részecske helyzete és sebessége: a határozatlansági elvből következően minél pontosabban ismerjük az egyiket, annál pontatlanabbul ismerjük a másikat.

Az üres űrben sem lehet tehát nulla valamely tér értéke, mivel ekkor pontosan ismernénk az értéket (nulla), és ennek időbeli változását is (szintén nulla). A tér értékének bizonyos minimális határozatlanságot - kvantum-fluktuációt - is tartalmaznia kell. Ezeket a fluktuációkat fény- vagy gravitációs részecskepároknak képzelhetjük, amelyek együtt jelennek meg, eltávolodnak, majd ismét találkoznak és megsemmisítik egymást. Valamennyien virtuális részecskék, olyanok, mint amelyek a Nap gravitációs erejét hordozzák: a valós részecskékkel szemben, semmiféle részecskedetektorral sem lehet közvetlenül megfigyelni őket. Közvetett hatásaik - például az atomok elektronpálya-energiáinak kicsiny változásai - viszont megmérhetők, és figyelemreméltóan jó egyezést mutatnak az elméleti előrejelzésekkel. A határozatlansági elv anyagi részecskék virtuális párjainak létezését is megjósolja, például elektronokét vagy kvarkokét. Ez esetben azonban a pár egyik tagja részecske és a másik antirészecske lesz (a fény és a gravitáció antirészecskéi azonosak a részecskékkel). A semmiből nem lehet energiát teremteni, ezért a részecske/antirészecske pár egyik

tagjának pozitív, a másiknak negatív energiája lesz. A negatív energiájú tag a virtuális részecskék rövid életére van kárhoztatva, mivel normális esetekben mindig a valós részecskének van pozitív energiája. A negatív energiájú részecskének tehát meg kell keresnie partnerét, és megsemmisülnie vele. Egy nagy tömegű test közelében azonban a valós részecske energiája kisebb, mint a testtől távolabb, mivel energiára volna szüksége, hogy a gravitációs vonzás ellenében magasabbra emelkedjék. Normális esetben a részecske energiája még pozitív, de a fekete lyuk belsejében olyan erős a gravitációs tér, hogy még a valós részecskének is lehet negatív energiája. Fekete lyuk közelében tehát elképzelhető, hogy a negatív energiájú virtuális részecske a lyukba zuhan, és valós részecskévé vagy antirészecskévé válik. Ez esetben már nem kell megsemmisülnie partnerével. Elhagyott társa maga is belezuhanhat a lyukba. Vagy pedig, pozitív energiája révén, mint valós részecske vagy antirészecske el is menekülhet a fekete lyuk közeléből (7.4. ábra). A távoli megfigyelő számára úgy tűnik, mintha a fekete lyuk bocsátotta volna ki. Minél kisebb a fekete lyuk, annál rövidebb távolságot kell a negatív energiájú részecskének megtennie, hogy valódi részecskévé váljon, azaz annál nagyobb a kibocsátott részecskék száma, vagyis a fekete lyuk látszólagos hőmérséklete.

A kilépő sugárzás pozitív energiáját a fekete lyukba áramló negatív energiájú részecskék árama egyenlíti ki. Einstein nevezetes egyenlete értelmében az energia arányos a tömeggel: E=mc2 (ahol E az energia, m a tömeg, c pedig a fénysebesség). A beáramló negatív energia tehát csökkenti a fekete lyuk tömegét. A tömeg csökkenése következtében csökken az eseményhorizont területe. Az ebből eredő entrópiacsökkenést (a lyuk belsejében) bőven meghaladja a kibocsátott sugárzás okozta entrópianövekedés, úgyhogy szó sincs a második főtétel megsértéséről.

Minél kisebb a fekete lyuk tömege, annál magasabb a hőmérséklete. Ahogy tehát fogy a fekete lyuk tömege, egyre nő a hőmérséklete és részecskekibocsátása, azaz egyre gyorsabban veszíti



7.4 ÁBRA

tömegét. Nem teljesen tisztázott még, mi történik akkor, ha a fekete lyuk végül rettenetesen kicsivé válik. Legésszerűbbnek az a feltevés látszik, hogy hatalmas végső részecskekibocsátás közepette teljesen megsemmisül; a hatás több millió H-bomba egyidejű fölrobbantásával egyenértékű.

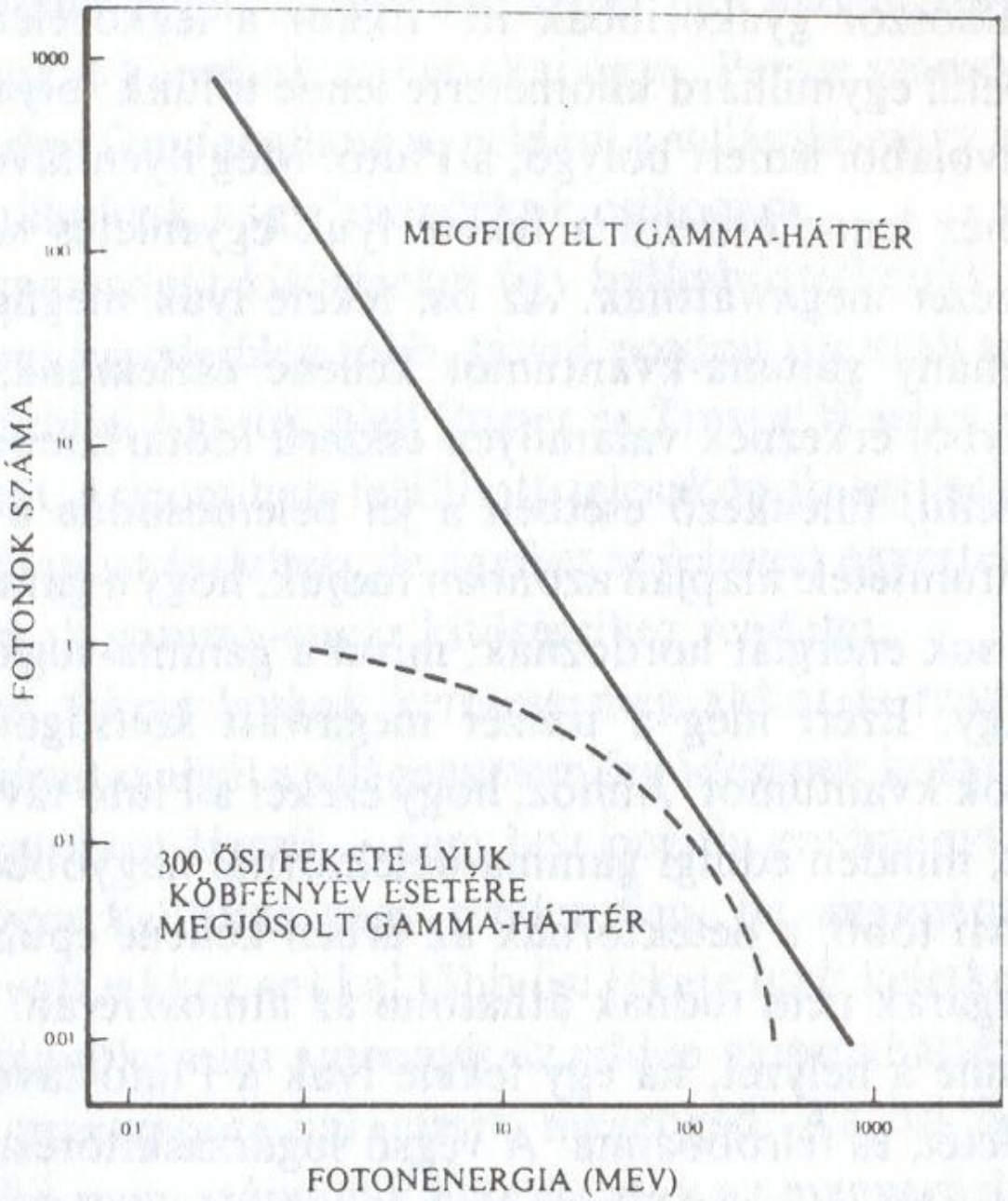
A Nap tömegénél néhányszor nehezebb fekete lyuk hőmérséklete alig tízmilliomod fokkal haladja meg az abszolút nullát. Ez sokkal alacsonyabb, mint a világmindenséget megtöltő mikrohullámú sugárzás hőmérséklete (kb. 2,70 az abszolút nulla fölött), ezért az ilyen fekete lyukak kevesebb részecskét bocsátanak ki, mint amennyit elnyelnek. Ha a világegyetem sorsa a folytonos tágulás, akkor a mikrohullámú sugárzás hőmérséklete előbb-utóbb az ilyen fekete lyukaké alá süllyed, ekkor tehát azok is veszíteni kezdik tömegüket.

Ennek mértéke azonban még ekkor is oly lassú lenne, hogy a lyuk teljes eIpárolgásáig millió millió millió millió millió millió millió millió millió millió évre (hatvanhat nulla az 1 után) volna szükség. Ez sokkal hosszabb, mint a világegyetem kora, ami alig tíz-húsz milliárd év (tíz nulla az 1 vagy 2 után). Másfelől viszont, amint a 6. fejezetben említettem, létezhetnek lényegesen kisebb tömegű, ősi fekete lyukak. amelyek a világegyetem történetének legkorábbi szakaszában, az inhomogenitások összeomlása révén keletkeztek. Az ilyen fekete lyukak hőmérséklete sokkal magasabb, sugárzásuk mértéke sokkal nagyobb. Ha az ősi fekete lyuk eredeti tömege egymilliárd tonna, akkor várható élettartama nagyjából egyenlő a világegyetemével. Az ennél kisebb kezdeti tömegű ősi lyukak valószínűleg elpárologtak már, a csak kevéssel nagyobb tömegűeknek viszont most is sugározniuk kell, mégpedig röntgen- vagy gammasugárzást kell kibocsátaniuk. A röntgen-

és gamma-sugarak olyanok, mint a fény hullámai, csak sokkal rövidebb a hullámhosszuk. Az ilyen lyukak aligha szolgálnak rá a fekete jelzőre: a valóságban inkább fehéren izzanak, energiakibocsátásuk mértéke mintegy tízezer megawatt.

Egyetlen ilyen fekete lyuk tíz nagyerőművet helyettesíthetne, ha szolgálatukba állíthatnánk energiáját. Ez azonban elég nehéznek ígérkezik: a fekete lyukban egy hegy tömege zsúfolódik egyetlen atommag térfogatába! Ha ezt a fekete lyukat a Földre hoznánk, sehogyse gátolhatnánk meg, hogy a talaj felszínét átszakítva a Föld középpontjába zuhanjon. Oda-vissza oszcillálna a Földben, míg végül megállapodna a középpontban. Egyetlen helyen hasznosíthatnánk kisugárzott energiáját: Föld körüli pályán. S egyetlen módon juttathatjuk oda: jókora tömeget kell vontatni előtte, valahogy úgy, mintha répát lógatnánk a szamár orra elé. Ez pedig, legalábbis a közeljövőben, nem tűnik kivitelezhetőnek.

Vajon milyen esélyeink vannak az ősi fekete lyukak sugárzásának megfigyelésére, ha már igánkba nem hajthatjuk energiájukat? Kereshetjük a gamma-sugarakat, amiket az ilyen lyukak életük nagy részében kibocsátanak. Legtöbbjük sugárzása a nagy távolság miatt fölöttébb gyenge, az együttes sugárzás azonban kimutatható lehet. Sikerült is ilyen gamma-háttérsugárzást találnunk: a 7.5. ábra mutatja az észlelt sugárzás erősségének változását a frekvencia (a hullámok másodpercenkénti száma) függvényében. Ezt a háttérsugárzást azonban más folyamatok is okozhatják, s valószínűleg éppen ez a



7.5 ÁBRA

helyzet. A 7.5. ábra pontozott vonala azt mutatja, hogyan kellene változnia az ősi fekete lyukak által kibocsátott gamma-sugárzás intenzitásának a frekvenciával, ha köbfényévenként átlagosan 300 ilyen lyuk létezne. Azt mondhatjuk tehát, hogy a gamma-háttér megfigyelése semmiféle pozitív bizonyítékot sem szolgáltatott az ősi fekete lyukak létéről, azt azonban megtudtuk belőle, hogy köbfényévenként átlagosan 300 darabnál nem lehet több ezekből a lyukakból. E határ szerint az ősi fekete lyukak a világegyetem anyagának legfeljebb egymilliomod részét tehetik ki.

Az ősi fekete lyuk tehát viszonylag ritka jelenség. Valószínűtlennek tűnhet, hogy akárcsak egyet is találjunk olyan közel, hogy önálló gamma-sugárzó forrásként megfigyelhessük. Mivel azonban a gravitáció mindenféle anyaghoz vonzza az ősi fekete lyukakat, sokkal gyakoribbaknak kéne lenniük a galaxisok környezetében és belsejében. A gamma-háttér azt mutatja, hogy átlagosan legfeljebb 300 lehet belőlük köbfényévenként, arról azonban semmit nem mond, hogy hány fordulhat elő a mi

galaxisunkban. Tegyük fel, hogy egymilliószor gyakoribbak itt. Ekkor a legközelebbi fekete lyuk körülbelül egymilliárd kilométerre lenne tőlünk: olyan messze, mint a legtávolabbi ismert bolygó, a Plútó. Még ilyen távolságról is roppant nehéz lenne észlelni a fekete lyuk egyenletes sugárzását, dacára a tízezer megawattnak. Az ősi fekete lyuk megfigyeléséhez legalább néhány gamma-kvantumot kellene észlelnünk, amelyek azonos irányból érkeznek valamilyen ésszerű időtartamon, például egy héten belül. Ellenkező esetben a jel belemosódna a háttérbe.

Planck kvantumtétele alapján azonban tudjuk, hogy a gamma-kvantumok igen sok energiát hordoznak, mivel a gamma-sugárzás frekvenciája nagy. Ezért még a tízezer megawatt szétsugárzása sem igényel túl sok kvantumot. Ahhoz, hogy ezeket a Plútó távolságából észlelhessük, minden eddigi gamma-detektornál nagyobbat kellene építenünk. Mi több, a detektornak az űrben kellene épülnie, mivel a gamma-sugarak nem tudnak áthatolni az atmoszférán.

Más lenne a helyzet, ha egy fekete lyuk a Plútó távolságában fejezné be életét, és felrobbanna. A végső sugárzáskitörést könnyen észlelhetnénk. Ha viszont fekete lyuk az elmúlt tíz-húszmillió év során egyfolytában sugárzott, akkor vajmi kevés az esélye, hogy pályafutását éppen az elkövetkező néhány éven belül fejezi be, és nem még néhány millió évvel később! Módot kell hát találnunk az egy fényév távolságon belül bekövetkező robbanás észlelésére, különben anélkül jár le a kutatási szerződésünk, hogy számottevő esélyünk lett volna a lyuk kimutatására. Így is fennmaradna a nagy detektor építésének problémája, hogy észlelhessünk néhányat a robbanás gamma-kvantumjai közül. Ekkor viszont már nem szükséges annak észlelése, hogy a kvantumok egy irányból érkeznek-e: elegendő volna, ha olyan rövid időközönként követnék egymást, hogy bízvást megállapíthassuk: valamennyien ugyanabból a robbanásból származnak.

Ilyen detektorként szolgálhat például a Föld teljes atmoszférája. (Különben sem valószínű, hogy ennél nagyobbat építtetnénk.) Amikor a nagyenergiájú gamma-foton eltalálja az atmoszféra atomjait, elektron-pozitron (antielektron) párokat hoz létre. Ezek további atomokat találnak el, miközben újabb elektron-pozitron párok keletkeznek, úgyhogy végül előáll az elektronzápor néven ismert jelenség. Az eredmény egyfajta fény, amit Cserenkov-sugárzásnak nevezünk. Gamma-sugár kitöréseket tehát úgy észlelhetünk, ha fényfelvillanásokat keresünk az éjszakai égen. Persze számos más jelenség is okozhat fényfelvillanást, például a villámlás vagy a Föld körül keringő műholdak vagy hulladékok csillogása.

A gammasugár-kitöréseket úgy különböztethetjük meg az ilyenektől, hogy egyidejűleg több, távoli ponton végzünk megfigyeléseket. Két dublini kutató, Neil Porter és Trevor Weekes végzett ilyen kutatásokat Arizonában felállított teleszkópok segítségével. Jó néhány felvillanást észleltek, de egyiket se lehetett egyértelműen az ősi fekete lyukak gamma-sugár kitöréseihez rendelni.

Az ősi fekete lyukak keresése még akkor is rengeteg értékes információval szolgál a világegyetem fejlődésének korai szakaszáról, ha - ahogy most látszik - nem hoz pozitív eredményt. Ha a fiatal világegyetem kaotikus vagy rendezetlen, ha anyagának nyomása alacsony volt, akkor sokkal több ősi fekete lyuk keletkezésére kellene számítanunk, mint amennyit az eddigi gammaháttér-megfigyelések által megszabott határérték megenged. Az ősi fekete lyukak észlelhetően nagy számának hiányát csak az magyarázhatja, hogy a korai világegyetem nagyon egyenletes és rendezett volt, és benne nagy nyomás uralkodott.

A fekete lyukak sugárzásának ötlete az első példája azoknak az előrejelzéseknek, amelyek alapvetően függenek a huszadik század mindkét nagy horderejű elméletétől, az általános relativitáselmélettől és a kvantummechanikától. Elképzeléseim kezdetben hallatlan ellenségességgel találkoztak, hiszen az uralkodó szemléletet támadtam: "Hogy bocsáthatna ki bármit is egy fekete lyuk?" Első ízben az Oxford melletti Rutherford-Appleton Laboratóriumban, egy konferencián ismertettem számításaim eredményét. Általános hitetlenség fogadott. A szekció elnöke, John G. Taylor a londoni King's College-ból, előadásom végén kijelentette, hogy képtelenség az egész. Még cikket is írt erről. John Taylor, és vele együtt a többség végül mégis arra a következtetésre jutott, hogy amennyiben az általános relativitáselméletről és a kvantummechanikáról alkotott képünk többi része helytálló, a fekete lyukaknak forró testek módjára kell sugározniuk. Így hát, noha mindeddig

nem sikerült ősi fekete lyukra bukkannunk, abban többnyire egyetértenek a szakemberek, hogy ha sikerülne rábukkannunk, rengeteg gamma- és röntgensugarat bocsátana ki.

A fekete lyukak sugárzásának létezése arra utal, hogy a gravitációs összeomlás nem is olyan végleges és megfordíthatatlan, mint ahogy azt valaha hittük. Nyilván megnő a fekete lyuk tömege, amikor beleesik az űrhajós, előbb-utóbb azonban sugárzás formájában visszajuttatja a világűrbe az így nyert többlettömeggel egyenértékű energiát. Bizonyos értelemben tehát az űrhajós "visszajut" közénk. Elég szánalmas persze az ilyen halhatatlanság, hiszen az időnek mindenfajta személyes koncepciója megszűnik az űrhajós számára, amikor darabokra szakad a fekete lyuk belsejében! Még a végül kisugárzott részecskék fajtája is általában különbözne az űrhajóst alkotó részecskékétől: nem maradna belőle más, csak testének tömege vagy energiája.

A közelítések, amelyek segítségével kiszámítottam a fekete lyukak sugárzását, mindaddig jól beválnak, amíg a fekete lyuk tömege meghaladja a gramm törtrészét. Megszűnik azonban érvényességük a lyuk élettartamának végén, amikor a tömege roppant kicsi lesz.

A legvalószínűbb végkifejlet szerint a lyuk egyszerűen eltűnik, legalábbis a világegyetemnek ebből a tartományából, és magával viszi az űrhajóst és minden szingularitást, ha egyáltalán van benne szingularitás. Ez volt az első jele annak, hogy a kvantummechanika esetleg eltávolíthatja a szingularitást, amit korábban az általános relativitáselmélet jósolt meg. Azok az eljárások azonban, amelyekkel 1974-ig próbálkoztunk, képtelenek voltak választ adni arra a kérdésre, hogy a kvantumgravitáció elméletében is felbukkannak-e a szingularitások. 1975-től ezért Richard Feynman eseményösszegzési elképzeléseit felhasználva hozzáláttam a kvantumgravitáció erőteljesebb közelítésének kifejlesztéséhez. A következő két fejezet azokat a válaszokat írja le, amelyeket ez a közelítés sugall a világegyetem eredetére és a benne foglaltak, például űrhajósok sorsára vonatkozóan. Látni fogjuk, hogy noha a határozatlansági elv határt szab valamennyi előrejelzésünk pontosságának, mégis megszüntetheti az előrejelzésnek azt az alapvető akadályát, amit a téridő szingularitása okoz.

A VILÁGEGYETEM EREDETE ÉS SORSA

Einstein általános relativitáselmélete - önmagában - azt jósolta, hogy a téridő egy Nagy Bumm típusú szingularitással kezdődött, és vagy egy Nagy Zutty típusú szingularitással fejeződik be (ha az egész világegyetem omlik össze), vagy pedig egy fekete lyuk belsejében kialakuló szingularitással (ha kis tartomány, például egy csillag omlik össze). A lyukba zuhanó anyag széthullik a szingularitásnál, és a külvilág számára csak tömegének gravitációs hatása maradna érzékelhető. Másfelől viszont, a kvantumjelenségek figyelembevételével úgy látszik, hogy az anyag tömege vagy energiája előbb-utóbb visszajut a világegyetem többi részébe, és a fekete lyuk - belsejében a szingularitással - párolog, majd végül eltűnik. Vajon ugyanilyen drámai hatással lesz-e a kvantummechanika a Nagy Bumm és Nagy Zutty szingularitásokra is? Mi történik a világegyetem fejlődésének legeslegkorábbi szakaszában, amikor a gravitációs terek olyan erősek, hogy nem hanyagolhatjuk el a kvantumjelenségeket? Van-e valójában kezdete és vége a világegyetemnek? És ha igen, milyenek azok? Az 1970-es években főként a fekete lyukakat tanulmányoztam.

1981-ben éledt újra érdeklődésem a világegyetem keletkezése és sorsa iránt, amikor egy jezsuiták szervezte konferencián vettem részt a Vatikánban. A katolikus egyház súlyos hibát követett el Galilei esetében, amikor törvénybe próbált iktatni egy tudományos kérdést, és kijelentette, hogy a Nap kering a Föld körül. Évszázadok múltán most úgy döntött, meghív néhány szakértőt és kikéri véleményüket a kozmológia kérdéseiben. A konferencia végén a résztvevőket audiencián fogadta a pápa. Mint mondotta, rendjén való, ha a világegyetem fejlődésének az ősrobbanást követő szakaszait tanulmányozzuk, de ne feszegessük magának a Nagy Bummnak a kérdését, mert ez volt a Teremtés pillanata, következésképpen Isten műve. Örültem, hogy a pápa nem tudta, miről tartottam előadást éppen ezen a konferencián - arról a lehetőségről, hogy a téridő véges ugyan, de határtalan, akkor pedig nincs kezdete, tehát a Teremtés pillanata se létezhetett. Nem szívesen osztoztam volna Galilei sorsában, akivel különben is elég sok közösséget érzek, egyebek közt azért, mert pontosan 300 évvel a halála után születtem!

A végett, hogy elmagyarázhassam a magam és mások elképzeléseit arról, hogyan befolyásolhatja a kvantummechanika a világegyetem eredetét és sorsát, előbb a világegyetem általánosan elfogadott történetét kell bemutatnom a "forró ősrobbanás" modell alapján. Ez feltételezi, hogy a világegyetemet a Friedmann-modell írja le, egészen a Nagy Bummig visszamenőleg. Az ilyen modellek szerint a világegyetem tágulásának mértékében hűl benne minden anyag és sugárzás. (Amikor a világegyetem mérete megkettőződik, hőmérséklete a felére csökken.) Mivel a hőmérséklet nem más, mint a részecskék átlagos energiájának - vagy sebességének - mértéke, a világegyetem lehűlése meghatározó jelentőségű a benne levő anyagra nézve. Nagyon magas hőmérsékleteken a részecskék olyan gyorsan mozognak, hogy mind a nukleáris, mind az elektromágneses erők vonzásából megszökhetnek. Számíthatunk viszont arra, hogy hűlés közben az egymást vonzó részecskék összetapadnak. Sőt: a világegyetemben létező részecskéknek még a típusa is a hőmérséklettől függ. Elég magas hőmérsékleteken a részecskék energiája olyan nagy, hogy ütközéseik nyomán számos részecske-antirészecske pár jön létre - s noha ezek egy része - antirészecskébe ütközve - megsemmisül, keletkezésük sebessége meghaladja a szétsugárzás sebességét. Alacsonyabb hőmérsékleten viszont kisebb energiájú részecskék ütköznek, a részecske-antirészecske párok lassabban keletkeznek - a szétsugárzás sebessége gyorsabb a keletkezésénél.

Az ősrobbanás pillanatában a világegyetemet nulla méretűnek, tehát végtelen forrónak tekintjük. Tágulása során azonban csökken a sugárzás hőmérséklete. Egy másodperccel a Nagy Bumm után körülbelül tízmillió fokra esik vissza. Ez körülbelül ezerszer magasabb a Nap közepében uralkodónál, de H-bombák robbantásakor is ekkora hőmérsékletek alakulnak ki. Ekkor a világegyetem főként fotont, elektront és neutrínót (rendkívül könnyű részecske, csak a gyenge kölcsönhatás és a gravitáció hat rá), valamint antirészecskéiket tartalmazza, emellett proton és neutron is akad benne. A világmindenség tágulásával és hőmérsékletének csökkenésével az ütközések keltette elektron-antielektron párok keletkezésének sebessége lassúbbá válik, mint szétsugárzásos megsemmisülésük sebessége. Az elektronok és antielektronok legnagyobb része tehát megsemmisül, a fotonok mennyisége nő, és csak néhány elektron marad. A neutrínók és antineutrínók azonban nem semmisülnek meg, mivel egymással és más részecskékkel is csak igen gyenge kölcsönhatásba lépnek.

Ezért mindmáig megmaradhattak. Ha ki tudnánk mutatni őket, azzal a nagyon forró korai világegyetem képe komoly próbát állna ki. Energiájuk sajnos mára olyan alacsony értékre süllyedt, hogy közvetlen megfigyelésük nem lehetséges. Ha azonban a neutrínók nem teljesen tömeg nélküliek, hanem van valamekkora saját tömegük - ahogy azt egy mindeddig meg nem erősített orosz kísérlet jelezte 1981-ben -, akkor közvetett módon kimutathatjuk őket: lehet, hogy ők alkotják a "sötét anyagot", amit korábban említettünk, s aminek gravitációs vonzása elegendő a világegyetem tágulásának megállításához és az összeomlás előidézéséhez.

Az ősrobbanás után mintegy száz másodperccel a hőmérséklet egymillió fokra esik, ami a legmelegebb csillagok belsejének felel meg. A protonok és neutronok energiája itt már nem elegendő az erős nukleáris kölcsönhatás vonzásának leküzdéséhez, ezért megkezdődik a deutérium (nehéz hidrogén) atommagjainak képződése; ezek egy protonból és egy neutronból állnak. Ezt követően a deutérium-magok további protonokkal és neutronokkal kapcsolódnak, és héliummagokat hoznak létre, melyek két protonból és két neutronból állnak. Kisebb mennyiségben létrejöhet két nehezebb elem, a lítium és a berillium magja is. Ki lehet számítani, hogy a "forró ősrobbanás"-modellben a protonok és neutronok negyede alakul át héliummaggá, emellett némi nehézhidrogén és egyéb elem keletkezik. A megmaradó neutronok protonná bomlanak, ezek a közönséges hidrogén atommagjai.

A világegyetem e korai, forró szakaszáról alkotott képet George Gamow terjesztette be először, diákjával, Ralph Alpherrel közösen írt híres cikkében, 1948-ban. Gamownak sajátos humora volt: rábeszélte Hans Bethét, a híres atomtudóst, hogy adja nevét a cikkhez, mert akkor a szerzők listája így alakul: "Alpher, Bethe, Gamow", ami olyan, mint a görög ábécé kezdete: alfa, béta, gamma. Roppant helyénvaló egy cikkben, ami a világegyetem kezdetének történetét feszegeti! Ebben a cikkben tették közzé figyelemre méltó megállapításukat, hogy a korai forró szakaszból származó

sugárzás (fotonsugárzás formájában) még mindig jelen van, hőmérséklete azonban alig néhány fok az abszolút nulla (-273 °C) fölött. Ezt a sugárzást fedezte fel Penzias és Wilson 1965-ben. Amikor Alpher, Bethe és Gamow cikke íródott, nem sokat tudtak a protonok és neutronok magreakcióiról. Ezért elég pontatlanok voltak a becslések a különféle elemek gyakoriságáról a korai világegyetemben. A számításokat azonban bővebb ismeretek birtokában megismételték, és most ragyogóan egyeznek a tapasztalatokkal. Sőt nagyon nehéz lenne bármilyen más módon magyarázni, miért van olyan sok hélium a világegyetemben. Így hát eléggé bizonyosak vagyunk benne, hogy a valóságnak megfelelő képünk van a történtekről, legalábbis a Nagy Bumm utáni első másodpercig visszamenőleg. Alig néhány órával a Nagy Bumm után meg is szűnik a hélium és a többi elem termelése. Az ezután következő mintegy egymillió éven át a világegyetem egyre csak tágul, anélkül, hogy valami különösebb történne. Előbb-utóbb a hőmérséklet eléri a néhány ezer fokot, és az elektronok és atommagok energiája már nem küzdheti le az elektromágneses vonzást: megkezdődik az atomok képződése.

A világegyetem, egészében véve, tovább tágul és hűl, az átlagosnál valamivel nagyobb sűrűségű tartományokban azonban a gravitációnövekmény hatására lelassul a tágulás. Sőt idővel meg is fordul, és egyes tartományokban újra megindul az összehúzódás. Az összehúzódó tartomány a rajta kívül eső anyagtömegek gravitációja hatására lassan pörögni kezd. Minél kisebbre zsugorodik, annál gyorsabban pörög - ahogy a jégpályán a korcsolyázó is felgyorsítja forgását, ha karjait behúzza. Amikor aztán elég kicsire zsugorodott a tartomány, olyan gyors lesz a pörgése, hogy ellensúlyozhatja a gravitációs vonzást. Így jönnek létre a korong alakú, forgó galaxisok. Más tartományok, amelyek nem kezdtek forogni, ovális objektumokat alkotnak, ezeket elliptikus galaxisoknak hívjuk. Az ilyen galaxisokban a gravitációs összeomlást az ellensúlyozza, hogy az egyes tartományok a galaxis központja körül forognak, miközben maga a galaxis mozdulatlan.

Az idő múltával a galaxisok héliuma és hidrogénje kisebb felhőkbe tömörül, ezek a saját gravitációjuk hatására zsugorodnak tovább. Az összehúzódás során az atomok mind gyakrabban ütköznek egymással, a gáz felmelegszik: egy idő után eléri a magfúziós reakciók megindulásához szükséges hőmérsékletet. A fúziós reakciók során a hidrogén héliummá alakul, a folyamatban fejlődő hő hatására nő a nyomás, és ez megakadályozza a felhők további zsugorodását. A felhők sokáig stabilak maradnak ebben az állapotban: csillagokká alakulnak, mint a mi Napunk, hidrogénjüket héliummá égetik, és a keletkező energiát fény és hő formában szétsugározzák.

A nagyobb tömegű csillagok szükségképpen forróbbak, mivel erősebb gravitációs vonzást kell kiegyenlíteniük. Emiatt magfúziós folyamataik olyan gyors ütemben mennek végbe, hogy alig százmillió év alatt felélik hidrogénkészletüket. Ekkor kis mértékben összehúzódnak, és ahogy még jobban felmelegszenek, hozzákezdenek a hélium még nehezebb elemekké, például szénné és oxigénné alakításához. Ez azonban már nem szabadít fel sokkal több energiát, előáll tehát az a krízis, amit a fekete lyukak fejezetében már megismertünk.

Nem teljesen tiszta, hogy ezután mi történik, de valószínűnek látszik, hogy a csillag központi része nagyon nagy sűrűségűvé zsugorodik, neutroncsillaggá vagy fekete lyukká válik. A külső részek néha hatalmas robbanás kíséretében leválnak; szupernóva jön létre, fénye az illető galaxis minden más csillagáét elhomályosítja. A csillag életének vége felé keletkezett nehezebb elemek egy része visszajut a galaxist alkotó gázfelhőbe, és a csillagok következő generációjának nyersanyagkészletét gyarapítja.

A mi Napunk körülbelül két százalékban tartalmaz ilyen nehezebb elemeket, lévén második vagy harmadik generációs csillag; mintegy ötmilliárd évvel ezelőtt keletkezett egy forgó gázfelhőből, ami korábbi szupernóvák maradványaiból jött létre. Az eredeti gázfelhő nagy része beépült a Napba, vagy elsodródott, a nehezebb elemek egy kisebb mennyisége pedig összetömörült, és létrehozta az égitesteket, amelyek ma a Földdel együtt bolygókként keringenek a Nap körül. A Föld kezdetben nagyon forró volt, és nem volt atmoszférája.

Az idők folyamán lehűlt, és a sziklákból kilépő gázok révén légkörre is szert tett. Ez a korai légkör nem kedvezett volna fajunk fennmaradásának. Oxigént nem tartalmazott, ehelyett rengeteg,

számunkra mérgező gáz volt benne, például kénhidrogén (ettől a gáztól bűzös a záptojás). Egyes primitív létformák azonban éppen ilyen körülmények között virulnak. Mai elképzeléseink szerint ezek az óceánokban jöttek létre, valószínűleg atomok véletlenszerű kombinációjának eredményeként; a keletkező nagy szerkezeteket makromolekuláknak hívjuk. Ezek a molekulák képesek voltak rá, hogy az óceán más atomjait is hasonló szerkezetekbe rendezzék. Így tehát reprodukálták önmagukat - szaporodtak és sokasodtak. Olykor persze hiba csúszott a reprodukciókba. Legtöbbször a hibás makromolekulák nem tudták reprodukálni magukat, és előbb-utóbb szétestek. Néhány hiba azonban olyan makromolekulákat eredményezett, amelyek még jobban reprodukálták önmagukat. Ezek tehát előnyösebb helyzetbe kerültek, és előbb-utóbb kiszorították az eredeti makromolekulákat.

Így indult az evolúció folyamata; ez vezetett a mind bonyolultabb, önmagukat reprodukáló organizmusok kialakulásához. Az élet első, primitív formái a legkülönbözőbb anyagokat fogyasztották, például kénhidrogént is, és oxigént bocsátották ki. Ez a folyamat lassacskán a ma megszokottra változtatta a légkör összetételét; ez tette lehetővé a magasabbrendű élőlények: halak, hüllők, emlősök, végül pedig az ember kifejlődését. A most megismert kép, amely szerint a világegyetem kezdetben nagyon forró volt, és hűlés közben tágult, megegyezik a ma rendelkezésünkre álló összes megfigyelés eredményével. Megválaszolatlanul hagy azonban számos fontos kérdést.

(l) Miért volt kezdetben olyan forró a világegyetem?

(2) Miért olyan egyforma a világegyetem nagyléptékű képe? Miért néz ki a tér minden pontján, bármely irányban ugyanolyannak? Különösképpen pedig miért találjuk csaknem teljesen egyformának a mikrohullámú háttérsugárzás hőmérsékletét, akárhová nézünk is? Olyan ez, mint amikor dolgozatot íratunk a diákokkal. Ha mindegyik pontosan ugyanazt a választ adja, akkor egészen biztosra vehetjük, hogy megbeszélték a megoldást. A korábban ismertetett modellben viszont a fénynek a Nagy Bumm óta még nem volt ideje, hogy az egyik távoli tartományból eljusson a másikba, hiába voltak ezek korábban egymáshoz közel. A relativitáselmélet szerint, ha a fény nem juthatott el egyik tartományból a másikba, akkor másféle információ se juthatott oda. A korai világegyetem különböző tartományai tehát sehogyse tehettek szert azonos hőmérsékletre, kivéve, ha valami - eddig megmagyarázatlan - okból eleve egyforma hőmérséklettel keletkeztek.

(3) Miért tágul a világegyetem már a kezdettől fogva a kritikushoz oly közeli sebességgel? A kritikus tágulási sebesség választja el egymástól azokat a modelleket, amelyek újra összezsugorodnak, azoktól, amelyek végtelen nagy méretre tágulnak. A világegyetem még tízmilliárd évvel a Nagy Bumm után is közel kritikus sebességgel tágul. Miért? Ha a tágulás sebessége az ősrobbanás utáni első másodperc végén akár csak száz billiomod résszel kisebb lett volna, akkor a világegyetem összeomlik, mielőtt eléri mai méretét.

(4) A világegyetem nagyléptékű homogenitása és egyformasága ellenére számos helyi rendezetlenséget tartalmaz, például csillagokat és galaxisokat. Úgy véljük, ezek a korai világegyetem sűrűségében, tartományról tartományra mutatkozó kicsiny különbségekkel alakultak ki. Mire vezethetők vissza ezek a sűrűségingadozások?

Az általános relativitáselmélet önmagában képtelen megmagyarázni ezeket a sajátságokat vagy megválaszolni a kérdéseket, mivel saját előrejelzése szerint a világegyetem végtelen sűrűségű állapotból keletkezett a Nagy Bumm szingularitásban. Ott pedig mind az általános relativitáselmélet, mind a fizika többi törvénye érvényét veszti: nem jósolható meg, hogy mi kerül ki a szingularitásból. Mint korábban láttuk, ez annyit jelent, hogy a Nagy Bummot minden korábbi eseménnyel együtt nyugodtan kivághatjuk az elméletből; mivel semmiféle befolyást sem gyakorolhatnak a ma megfigyelhető valóságra.

E szerint az elmélet szerint igenis van határa a téridőnek, mégpedig kezdete, a Nagy Bumm pillanatában. A tudomány a jelek szerint olyan törvényeket tárt fel, amelyek a határozatlansági elv korlátai között megmondják, hogyan fejlődik tovább a világegyetem, ha az állapotát valamely

időpontban ismerjük. Lehet, hogy ezeket a törvényeket eredetileg Isten rendelte el.

A továbbiakban viszont valószínűleg hagyta, hogy e törvények működ tessék a világegyetemet, ő maga azóta nem avatkozott be. Vajon hogyan választotta meg a világegyetem kezdeti állapotát vagy szerkezetét? Melyek voltak az idő kezdetén a "határfeltételek"?

Az egyik lehetséges válasz szerint nem remélhetjük, hogy megértjük Isten szándékait a világegyetem kezdeti elrendezésének megválasztásában. Egy mindenható lénynek ez kétségkívül hatalmában állna, ha azonban ilyen rejtelmes módot választott a gépezet beindítására, miért hagyta, hogy számunkra is érthető törvények alapján fejlődjék tovább? A tudomány egész története annak a ténynek a fokozatos felismeréséből áll, hogy az események nem önkényes módon zajlanak, hanem bizonyos alapvető rendet tükröznek, és ez vagy isteni eredetű, vagy sem. Mi sem természetesebb annál a feltételezésnél, hogy ez a rend nem csupán a törvényekre érvényes, hanem a téridő határán uralkodó körülményekre is, amelyek meghatározzák a világegyetem kiindulási állapotát. A világegyetem számos olyan modellje elképzelhető, amelyek kezdeti feltételei eltérnek, és mégis mindegyik engedelmeskedik a törvényeknek. Léteznie kell valamilyen elvnek, amely alapján egyetlen kiindulási állapotot, tehát egyetlen modellt választhatunk ki a világegyetem leírására.

A sok lehetőség egyikét kaotikus határfeltételeknek nevezzük. Ezek mélyén kimondhatatatlanul ott rejlik a feltevés: vagy térben végtelen a világegyetem, vagy pedig végtelen sok világegyetem létezik. Kaotikus határfeltételek esetén közvetlenül a Nagy Bumm után bizonyos értelemben ugyanakkora valószínűséggel találjuk a tér valamely kiszemelt tartományát bármely adott elrendezésűnek, mint akármilyen más elrendezésűnek: a világegyetem kezdeti állapota véletlenszerűen választható meg. Ez azt jelentené, hogy a korai világegyetem valószínűleg roppant kaotikus és szabálytalan volt, mivel sokkal több kaotikus és rendezetlen konfiguráció képzelhető el, mint sima és rendezett. (Ha minden konfiguráció egyformán valószínű, akkor a világegyetem feltehetőleg kaotikus és rendezetlen állapotban keletkezett, egyszerűen azért, mert sokkal több ilyen állapot van.) Nehezen látható, hogyan vezethetnek az ilyen kaotikus kezdeti feltételek olyan világegyetem kifejlődésére, amely nagy léptékben szemlélve annyira sima és szabályos, mint most a mienk.

Ilyen modelltől azt is elvárnánk, hogy a sűrűségfluktuációk - a gamma-háttér megfigyelése alapján - a meghatározott felső korlátnál sokkal több ősi fekete lyuk képződéséhez vezessenek. Ha a világmindenség térbeli kiterjedése valóban végtelen, vagy ha végtelen sok világegyetem van, akkor bizonyára léteznek valahol olyan tartományok is, amelyek sima és egyenletes formában jöttek létre. Hasonlít a dolog a közismert majomcsapatra, melynek tagjai írógépeken kopognak - leginkább értelmetlen badarság születik, de merő véletlenségből akár Shakespeare egyik-másik szonettje is megszülethet. Elképzelhető-e, hogy ugyanezt a világegyetemre vonatkoztatva, mi is egyszerűen olyan tartományban élünk, amely merő véletlenből sima és homogén? Első pillantásra ez kicsiny valószínűségű lehetőségnek tűnik, mivel a sima tartományok száma bizonyára eltörpül a kaotikus és rendezetlen tartományoké mellett. Tegyük fel azonban, hogy csak a sima tartományokban jöhetnek létre galaxisok és csillagok, és csak itt felelnek meg a körülmények a hozzánk hasonló, bonyolult, önmagukat reprodukáló szervezetek - emlősök, madarak stb. - kialakulásához. Vagy éppen olyanokéhoz, akik feltehetik a kérdést: Miért ilyen sima a világegyetem? Szép példája ez az úgynevezett antropikus elv alkalmazásának, amit így is magyarázhatnánk: "A világot azért látjuk olyannak, amilyen, mert létezünk." Az antropikus elvnek két változata létezik, a gyenge és az erős.

A gyenge antropikus elv szerint az igen nagy - vagy térben és időben végtelen - világegyetemben az intelligens élet kialakulásához szükséges feltételeknek csak térben és időben korlátozott tartományok felelhetnek meg. Az ilyen tartományokban élő értelmes lényeknek tehát nincs miért meglepődniük, ha észreveszik, hogy a világegyetemben éppen az ő környezetük olyan, amilyen létezésük feltételeihez szükséges. A dolog emlékeztet a divatos környéken lakó gazdag ember esetére, aki sose lát szegénységet maga körül.

A gyenge antropikus elv használatának esete az a "magyarázat", amely szerint a Nagy Bumm azért éppen tízmilliárd évvel ezelőtt történt, mert ennyi időre van szükség az értelmes élet kialakulásához.

Mint már láttuk, előbb a csillagok első generációjának kellett létrejönnie. Ezek az eredetileg keletkező hidrogén és hélium egy részét nehezebb elemekké, például szénné és oxigénné alakították, ezekből épül fel a testünk. Ezt követően a csillagok szupernóvákként felrobbantak, és roncsaikból keletkezett a többi csillag és bolygó, köztük a Naprendszer is, mintegy ötmilliárd évvel ezelőtt. A Föld létezésének első egy-két milliárd éve túl forró volt ahhoz, hogy bármi összetettebb kifejlődjék. A következő hárommilliárd év a biológiai evolúció lassú folyamatának jegyében telt el, ez vezetett a legegyszerűbb organizmusoktól az olyan lények kifejlődéséig, akik képesek rá, hogy a Nagy Bummig visszamenőleg megmérjék az időt.

Kevesen vitatkoznának a gyenge antropikus elv érvényességévei vagy hasznosságával. Néhányan azonban még messzebb mennek, és az elv erős változatát támogatják. Eszerint vagy rengeteg különféle világegyetem létezik, vagy rengeteg tartomány ugyanazon világegyetemen belül; mindegyiknek megvan a maga kezdeti konfigurációja, és talán saját tudományos törvényei is. E világegyetemek többségében a feltételek nem kedveznek bonyolult szervezetek létrejöttének; csak a mienkhez hasonló néhány világegyetemben fejlődhetnek ki intelligens lények, és tehetik fel a kérdést: "Miért olyan a világegyetem, amilyennek látjuk?" Így már egyszerű a válasz: ha másmilyen lenne, nem lennénk itt!

Mai ismereteink szerint a tudomány törvényei sok alapvető számértéket tartalmaznak, például az elektron elektromos töltésének nagyságát, vagy a proton és elektron tömegének arányát. Ezeket az értékeket-legalábbis jelenleg - nem tudjuk elméletileg megjósolni, a megfigyeléseinkre vagyunk utalva. Elképzelhető, hogy egy szép napon teljes körű egyesített elméletet fedezünk fel, és ez mindegyiket megjósolja, bár az sincs kizárva, hogy világegyetemről világegyetemre, vagy akár egy világegyetemen belül is változik közülük egy vagy több. Mindenesetre figyelemre méltó, hogy ezek a számok olyanok, mintha nagyon precízen beállították volna őket az élet kifejlődését lehetővé tevő értékekre. Ha például az elektron elektromos töltése csak egy kicsit is más, akkor a csillagok vagy nem alakíthatnák héliummá a hidrogént, vagy sose robbannának fel. Elképzelhetők persze másmilyen intelligens életformák is, olyanok, amilyenekről még a sci-fi szerzők se álmodtak, s amilyenek nem igénylik a Naphoz hasonló csillagok fényét, vagy a csillagokat alkotó nehezebb elemeket, amelyek az űrbe sodródnak a csillag felrobbanásakor. Annyi mindenesetre világosnak látszik, hogy viszonylag alacsony értéktartomány teszi lehetővé az értelmes élet bármely formájának kialakulását. A legtöbb értékkészlet olyan világegyetemet eredményez, ami talán gyönyörű, de senki sincs benne, aki csodálhatná ezt a szépséget. Ezt egyaránt felfoghatjuk akár a Teremtés és a tudományos törvények megválasztása mögött rejlő isteni célként, akár az erős antropikus elv alátámasztásaként.

Számos ellenvetés tehető a világegyetem megfigyelt állapotának magyarázatául szolgáló erős antropikus elv elleen. Mindenekelőtt, miféle értelemben nevezhető az a sok világegyetem létezőnek? Ha tényleg elkülönülnek egymástól, akkor a mi világegyetemünkben semmi megfigyelhető következménnyel sem jár az, ami valamelyik másik világegyetemben történik. A gazdaságosság elvéhez kell tehát folyamodnunk, lemetszenünk őket az elméletről. Ha viszont egyetlen világegyetem különféle tartományairól van szó, akkor a tudomány törvényeinek mindenütt azonosaknak kell lenniük, különben nem mozoghatnának folyamatosan egyik tartományból a másikba.

Ez esetben a tartományok kizárólag kezdeti elrendeződésükben különbözhetnek, az erős antropikus elv tehát a gyenge változattá redukálódik. Másodjára azt lehet felhozni az erős antropikus elvvel szemben, hogy a tudomány egész eddigi történetének folyamával szemben halad Ptolemaiosz és követői geocentrikus világképétől kiindulva, Kopernikusz és Galilei heliocentrikus kozmológiáján át jutottunk el a modern képig. A Föld immár úgy jelenik meg, mint egy átlagos csillag körül keringő közepes méretű bolygó, valahol egy közönséges spiralgalaxis külterületén. Ez a galaxis maga is csak egyike a megfigyelhető milliárdnyi galaxisnak. Az erős antropikus elv viszont kijelenti, hogy ez az egész irdatlan szerkezet kizárólag a mi kedvünkért jött létre. Nagyon-nagyon nehéz ezt elhinni. Létezésünknek nyilván előfeltétele a Naprendszer léte, és ugyanezt mondhatjuk egész galaxisunkra, mivel a benne helyet foglaló csillagok korábbi generációinak kellett

előállítaniuk a nehéz elemeket. Mindehhez azonban az égvilágon semmi szükség sincs az összes többi galaxisra, sem pedig arra, hogy a világegyetem nagy léptékű képe minden irányban olyannyira egyforma legyen.

Az ember sokkal könnyebben elfogadná az antropikus elvet, legalábbis annak gyenge változatát, ha meg tudnánk mutatni, hogy a legkülönbözőbb kezdeti konfigurációk is a jelenleg megfigyelhetőhöz hasonlót eredményezhetnek. Az így keletkező világegyetem ugyanis véletlenszerű kezdeti feltételek mellett is számos sima, homogén, az intelligens élőlények kifejlődésére alkalmas tartományt foglalna magában. Másfelől viszont, ha a világegyetem kezdeti állapotát rettenetes gonddal kellett megválasztani, hogy ama körülöttünk láthatóhoz hasonló alakuljon ki belőle, akkor teljesen valószínűtlen lenne, hogy egyáltalán előforduljon olyan tartomány, amelyben élet is létrejöhet. A fentebb leírt "forró ősrobbanás" -modell szerint a világegyetem korai szakaszában nem volt idő rá, hogy egyik tartományból hő áramoljék a másikba. Ezért a világegyetem kezdeti állapotában pontosan azonos hőmérsékletnek kellett uralkodnia ahhoz, hogy a mikrohullámú háttérsugárzás hőmérsékletét ma minden irányban ugyanakkorának találhassuk. A tágulás kezdeti sebességét is nagyon pontosan kellett volna megválasztani, hogy olyannyira közel legyen az újbóli zsugorodás megindulását lehetővé tevő kritikus sebességhez, de mégis meghaladja. Ez annyit jelent, hogy a világegyetem kezdeti sebességét igen nagy gonddal kellett megválasztani, ha a "forró ősrobbanás"-modell egészen az idő kezdetéig teljesen helytálló. Hallatlanul nehéz lenne a világmindenség születésének ilyen módját másként megmagyarázni, mint Isten cselekedeteként, amivel célja a hozzánk hasonló lények teremtése volt.

A Massachusetts Institute of Technology egyik tudósa, Alan Guth a világegyetem olyan modelljét kereste, amely szerint különféle kezdeti konfigurációk esetén is a maihoz hasonló állapot fejlődhet ki. Evégett felvetette, hogy a korai világegyetem egy időszakban rendkívül gyorsan tágult. Ezt a tágulási szakaszt "inflációsnak" szokás nevezni, ami alatt az értendő, hogy a világegyetem ekkor egyre gyorsabban tágult, nem pedig egyre lassabban, mint most. A világegyetem sugara Guth szerint a másodperc icipici töredéke alatt millió millió millió millió milliószorosára nőtt (harminc nulla az l után). Guth elképzelése szerint a világegyetem a Nagy Bumm után roppant forró és eléggé kaotikus állapotba került. A magas hőmérsékletek következtében a részecskék óriási sebességgel mozognak, igen nagy az energiájuk. Mint korábban láttuk, ilyen magas hőmérsékletek esetén arra számíthatunk, hogy az erős és a gyenge nukleáris, valamint az elektromágneses kölcsönhatás egyetlen erővé egyesülnek. Tágulás közben a világegyetem hőmérséklete csökken, a részecskék energiái is kisebbek lesznek. Előbb-utóbb sor kerül a fázisátalakulásnak nevezett jelenségre. Megtörik az erők szimmetriája: az erős kölcsönhatás különválik a gyenge és az elektromágneses erőtől.

A fázisátalakulás tipikus példája játszódik le, amikor a vizet lehűtjük és megfagyasztjuk. A folyékony víz szimmetrikus: ugyanúgy néz ki minden pontban és minden irányban. A képződő jégkristályoknak ezzel szemben egyértelmű helyzetük lesz, és felsorakoznak valamilyen irányban. Mindez megtöri a víz szimmetriáját. Ha ügyesek vagyunk, a vizet túlhűthetjük, vagyis hőmérsékletét a fagyáspontja (0 °C) alá csökkenthetjük anélkül, hogy jég képződne. Guth elképzelése szerint hasonlóan viselkedhetett a világegyetem is: a hőmérséklet a kritikus alá csökkent anélkül, hogy az erők szimmetriája megtört volna. A világegyetem ez esetben instabil állapotba került, több energiája maradt, mintha megtört volna a szimmetria. Kimutatható, hogy ez az energia fölösleg antigravitációs hatású: ugyanúgy viselkedne, mint a kozmológiai állandó, amit Einstein azért vezetett be az általános relativitáselméletbe, hogy statikus legyen a világegyetem modellje. Mivel ebben a modellben a világegyetem ugyanúgy tágul, mint a "forró ősrobbanás"-modellben, a tágulás sebessége e kozmológiai állandó taszító hatására egyre nő.

Sőt a taszító hatás még azokban a tartományokban is elnyomja a gravitációs vonzást, amelyekben az átlagosnál több anyagi részecske található. Következésképp ezek is inflációsan gyorsulva tágulnak. Ahogy a részecskék egyre távolabb kerülnek egymástól, egyszer csak ott állna a táguló világegyetem, ami alig tartalmaz anyagi részecskéket és még mindig túlhűlt állapotban van. A tágulás egyszerűen kivasalja a világegyetem összes szabálytalanságát, ahogy a léggömb ráncai is

kisimulnak, miközben felfújjuk. A világegyetem jelenlegi sima, homogén állapota tehát többféle nem-homogén kiindulási állapotból is kifejlődhetett.

Ebben a világegyetemben, ahol a tágulást kozmológiai állandó gyorsítja, ahelyett, hogy gravitációs vonzás lassítaná, a fejlődés korai szakaszában a fénynek van rá ideje, hogy az egyik tartományból a másikba jusson. Ez megoldja a korábban említett problémát, hogy miért lehetnek a korai világegyetem különböző tartományainak azonosak a tulajdonságaik. Sőt mi több, a tágulás sebessége automatikusan a világegyetem energiasűrűsége által meghatározott kritikus érték közelébe kerül. Magyarázatot nyerünk tehát a tágulási sebességkritikushoz közeli voltára anélkül, hogy különleges gonddal megválasztott kezdeti sebességet kellene feltételeznünk.

Az inflációs elmélet azt is megmagyarázza, miért van olyan sok anyag a világegyetemben. Az általunk megfigyelhető tartományban mintegy százmillió millió millió millió millió millió millió millió millió millió millió millió millió (nyolcvan nulla az 1 után,) részecske van. Honnan kerültek ezek elő? A kvantumelmélet válasza szerint a részecskéket energiából lehet előállítani részecske/antirészecske-párok alakjában. Ez azonban újabb kérdést vet fel: honnan jött ez a rengeteg energia? A válasz az, hogy a világegyetem összes energiája pontosan nulla. A világegyetem anyaga pozitív energiából áll. Az anyag azonban a gravitáció révén mindenütt vonzza önmagát. Két egymás melletti anyagdarab kevesebb energiát tartalmaz, mint ugyanez a két anyagdarab, egymástól jókora távolságra, hiszen eltávolításukhoz be kell fektetnünk a kettejüket összehozó gravitációs erő leküzdésére szolgáló energiát. Bizonyos értelemben tehát a gravitációs mezőnek negatív energiája van. A térbelileg hozzávetőlegesen homogén világegyetem esetében kimutatható, hogy a negatív gravitációs energia pontosan kiegyenlíti az anyag által képviselt pozitív energiát. A Világegyetem összes energiája tehát nulla.

Kétszer nulla természetesen szintén nulla. A világegyetem tehát megkétszerezheti a pozitív anyagi energiáját és a negatív gravitációs energiáját anélkül, hogy megsértené az energiamegmaradás elvét. A közönséges tágulás során, amikor a világegyetem növekedésével az anyagi energiasűrűség csökken, ilyesmi nem történik. Sor kerül viszont rá az inflációs tágulás folyamán, mivel a túlhűtött állapot energiasűrűsége tágulás közben is állandó marad: a kétszer akkorára nőtt világegyetemben mind a pozitív anyagi energia, mind a negatív gravitációs energia megkétszereződik, a teljes energiatartalom tehát továbbra is nulla. Az inflációs szakaszban a világegyetem óriási mértékben növeli térfogatát. A részecsketeremtéshez rendelkezésre álló energia mennyisége tehát szintén nagyon nagy. - Kutyából nem lesz szalonna - kommentálta az esetet Guth. - De úgy látszik, kivétel erősíti a világegyetemet.

A világegyetem ma már nem inflációsan tágul. Léteznie kell tehát valamiféle mechanizmusnak a roppant nagy effektív kozmológiai állandó eltávolítására és a tágulás sebességének megváltoztatására, hogy az eredeti gyorsuló tágulás helyett előálljon a ma észlelhető, gravitáció lassította tágulás. Az inflációs tágulás során arra számítunk, hogy az erők szimmetriája előbb-utóbb megtörik, mint ahogyan a túlhűtött víz is a végén megfagy. Ekkor felszabadul a töretlen szimmetriájú állapot energiatöbblete, és a világegyetemet éppen az erők szimmetriájának kritikus hőmérséklete alatti értékre hevíti. Innen a világegyetem pontosan Úgy tágul, ahogy a "forró ősrobbanás" -modell leírja, viszont most már van magyarázatunk arra, hogy miért tágul a világegyetem közel kritikus sebességgel és miért azonos a legkülönbözőbb tartományok hőmérséklete.

Guth eredeti elképzelése szerint a fázisátalakulásnak hirtelen kell történnie, hasonlóan a jégkristályok megjelenéséhez a nagyon hideg vízben. Az elgondolás szerint a megtört szimmetriájú új fázis "buborékjai" jelennek meg a régi fázisban, mint gőzbuborékok a forró vízben. A buborékoknak növekedniük és egyesülniük kéne, míg végül az egész világegyetem az új fázisba kerülne. Mint jómagam és mások rámutattunk, ezzel az a baj, hogy a világegyetem gyors tágulása következtében a buborékok nemhogy egyesülnének : még akkor is távolodnak egymástól, ha a fény sebességével növekednek!

A világegyetem fölöttébb inhomogén állapotban maradna, egyes tartományokban az erők töretlen

szimmetriájával. Ez a modell nem felel meg a megfigyeléseknek.

1981-ben Moszkvában jártam, részt vettem a kvantumgravitációról rendezett konferencián. A konferencia után szemináriumot tartottam a Sternberg Csillagászati Intézetben az inflációs modellről és a vele kapcsolatos problémákról. A hallgatóság soraiban ott ült Andrej Linde, egy fiatal orosz, a moszkvai Lebegyev Intézettől. Megjegyezte, hogy a buborékok egyesülésével kapcsolatos nehézség elkerülhető, ha a buborékok akkorák, hogy az általunk észlelhető tartomány belefér egyetlen buborékba. Ez pedig akkor lehetséges, ha a szimmetria megtörésére vezető változás nagyon lassan megy végbe a buborékban, ami a nagyegyesített elméletek szerint teljesen elképzelhető. Linde elképzelése a szimmetria lassú megtöréséről kitűnő volt, később azonban rájöttem, hogy azoknak a buborékoknak nagyobbaknak kellett volna lenniük a világegyetem akkori méreténél! Kimutattam, hogy nemcsak valamely buborékon belül, hanem mindenütt egyszerre kellett a szimmetriának megtörnie. Ez vezet a ma megfigyelhető homogén világegyetem kialakulására. Saját ötletem nagyon fellelkesített. Meg is beszéltem a dolgot egy diákommal, lan Mossal. Linde barátjaként meglehetősen kínosan érintett, hogy később egy tudományos folyóirat hozzám küldte bírálatra Linde cikkét. Válaszomban felhívtam a figyelmet erre a hibára - hogy a buborékok nagyobbak a világegyetemnél -, de kiemeltem, hogy a szimmetria lassú megtörésére vonatkozó elképzelés kitűnő. Azt javasoltam, hogy az újság változatlan formában közölje a cikket, mivel Linde számára hónapokba kerülne a javítás; minden küldeményének át kell futnia a szovjet cenzúrán, ők pedig se nem rutinosak, se nem fürgék, ha tudományos közleményekről van szó. Ehelyett lan Mossal közösen rövid cikket írtam ugyanabban a folyóiratban; ebben rámutattunk a buborékokkal kapcsolatos problémára, és megmutattuk a megoldást is.

Alig tértem vissza Moszkvából, mindjárt másnap indultam Philadelphiába, hogy átvegyem a Franklin Intézet emlékérmét. Titkárnőm, Judy Fella korántsem csekély személyes varázsát bevetve meggyőzte a British Airways illetékeseit, hogy pompás reklám lesz a társaság számára, ha ő és én ingyenjegyet kapunk a Concorde-ra.

Míg azonban a reptér felé utaztam, óriási felhőszakadás tört ki, és emiatt lekéstem a gépet. Persze végül eljutottam Philadelphiába és átvettem a medált. Meg is kértek, hogy tartsak szemináriumot az inflációs világegyetemről. Szinte mindvégig az inflációs modell problémáiról beszéltem, ugyanúgy, mint Moszkvában, a végén azonban megemlítettem Linde elképzelését a szimmetria lassú megtöréséről, és kitértem saját korrekciós javaslataimra is. Hallgatóim között ott ült a Pennsylvania Egyetem fiatal adjunktusa, Paul Steinhardt is. Az előadás után az inflációs modellről beszélt velem. A következő év februárjában elküldte hozzám cikkét, amit diákjával, Andreas Albrechttel közösen írt, s amiben Linde elgondolásához nagyon hasonló javaslatot tettek a szimmetria lassú megtöréséről. Steinhardt később elmesélte, nem emlékezett rá, hogy én előadtam Linde elméletét, s cikkét is csak akkor látta, amikor már befejezték Albrechttel a sajátjukat. Nyugaton most neki és Albrechtnek, valamint Lindének tulajdonítják a szimmetria lassú megtörésén alapuló "új inflációs modell" szerzőségét. (A régi inflációs modell Guth eredeti elképzelése volt, a szimmetria gyors megtörésével és a buborékképződéssel.) Az új inflációs modell sikeres erőfeszítést tett, hogy megmagyarázza, miért olyan a világegyetem, amilyennek látjuk. Mint ahogy azonban másokkal együtt én is rámutattam, az elmélet - legalábbis eredeti formájában - a megfigyeltnél sokkal nagyobb változásokat jósol a mikrohullámú háttérsugárzás hőmérsékletében. Későbbi tanulmányok azt is kétségbevonják, hogy egyáltalán sor kerülhetett-e a kívánt jellegű fázisátalakulásra a világegyetem korai fejlődési szakaszában. Személyes véleményem szerint az inflációs modell mint tudományos elmélet már kimúlt, bár a jelek szerint többen még nem értesültek elhalálozásáról, és úgy irkálnak cikkeket róla, mintha élne és virulna. 1983-ban Linde jobb modellt terjesztett elő, a kaotikus inflációs modellt. Ebben se fázisátalakulás, se túlhűlés nem szerepel.

Ehelyett egy zérus spinű tér jelenik meg, amely a kvantumfluktuációk következtében a korai világegyetem egyes tartományaiban igen nagy értékekre tesz szert. Ezekben a tartományokban e tér energiája a kozmológiai állandó szerepét tölti be. Taszító gravitációs hatással rendelkezik, s emiatt a kérdéses tartományokat inflációs tágulásra készteti. Miközben tágulnak, a tartományok energiája lassan csökken, míg az inflációs tágulás "forró ősrobbanás"-modell tágulásához hasonlóra szelídül.

Az egyik ilyen tartomány válik a ma megfigyelhető világegyetemmé. E modell magáénak mondhatja az összes korábbi inflációs modell előnyeit, viszont nem függ a fölöttébb kétséges fázisátalakulástól, és a megfigyelésekkel egyező mértékűnek jósolja a mikrohullámú háttérsugárzás hőmérséklet-ingadozását.

Az inflációs modellekkel kapcsolatos munka rávilágított, hogy a világegyetem jelenlegi állapota nagyszámú kiindulási állapot alapján létrejöhetett. Ez azért nagy jelentőségű, mert megmutatja, hogy a világegyetem általunk lakott részének kezdeti állapotát nem kellett különös gonddal kiválasztani. Ha tehát óhajtjuk, használhatjuk a gyenge antropikus elvet annak megmagyarázására, hogy miért néz ki olyannak a világegyetem, mint amilyennek látjuk.

Az viszont kizárható, hogy minden kiindulási állapotból a jelenleg megfigyelhető világegyetem fejlődhetne ki. Tekintsünk például egy, a maitól nagymértékben eltérő állapotot, olyat, amelyben a világegyetem kifejezetten göröngyös és szabálytalan. A tudomány törvényeit felhasználva visszafelé is követhetjük a világegyetem fejlődését, és megállapíthatjuk, milyen volt a konfigurációja valamely régebbi időpontban. A klasszikus általános relativitáselmélet szingularitási tétele szerint a végén ott találnánk a Nagy Bumm szingularitást. Ha ezt a világegyetemet fejlesztjük ki a tudomány törvényei segítségével, visszakapjuk a göröngyös, szabálytalan állapotot, amiből kiindultunk. Lenniük kell tehát bizonyos kezdeti állapotnak, amelyek nem a ma látható világegyetemet eredményezik. Még az inflációs modell sem árulja el tehát, miért nem volt olyan a kiindulási állapot, hogy valami egészen más szülessék belőle? Mégis az antropikus elvhez kell folyamodnunk magyarázatért? Vakszerencséről volna szó? Ilyesmit elkeseredésünk sugallatára gondolhatunk csupán, hiszen ez ellentmondana abbeli reményünknek, hogy megérthetjük a világegyetemet megalapozó rendet.

A világegyetem kezdeti viszonyainak megjósolásához olyan törvényekre van szükségünk, amelyek az idő kezdetén is érvényesek. Ha a klasszikus általános relativitáselmélet helytálló, akkor a szingularitási tétel, amit Roger Penrose-zal közösen igazoltunk, megmutatja, hogy az idő kezdete egyetlen végtelen sűrűségű és a téridőben végtelen görbületű pont volt. A tudomány összes ismert törvénye csődöt mond ilyen helyen. Föltételezhetjük, hogy vannak itt is érvényes új törvények, de az ennyire rosszul viselkedő pontokon érvényes törvényeknek még a megfogalmazása is borzasztó nehéz volna, és megfigyelési adatokra se támaszkodhatnánk iránymutatás végett.

Valójában a szingularitási tételek azt jelzik, hogy a gravitációs tér annyira erőssé válik, hogy megnő a kvantumgravitációs jelenségek fontossága: a továbbiakban a klasszikus elmélet már nem írhatja le jól a világegyetemet. Ha a világegyetem korai állapotait kívánjuk leírni, a gravitáció kvantumelméletéhez kell folyall1odnunk. Mint látni fogjuk, a kvantumelmélet alkalmazása esetén mindig és mindenütt érvényesek maradnak a tudomány szokványos törvényei, még az idő kezdetekor is: nincs szükség új törvények feltételezésére a szingularitásokban, mivel a kvantumelméletnek nincs szüksége szingularitásokra. Még nem áll rendelkezésünkre a kvantummechanikát és a gravitációt összekapcsoló teljes, ellentmondásmentes elmélet. Eléggé bizonyosak vagyunk azonban egy ilyen egyesített elmélet néhány vonását illetően. Így például tudjuk, hogy tartalmaznia kell Feynman elképzelését a kvantumelmélet eseményösszegzéseken alapuló megfogalmazására. A klasszikus elméletekkel szemben, ebben a közelítésben a részecskének nincs egyetlen múltja. Ehelyett olybá vesszük, hogy a részecske minden megengedett pályát befut a téridőben. Minden ilyen pályát két számmal jellemzünk: az egyik a nagyságára jellemző, a másik a fázisára (a cikluson belüli helyzetére). Ha arra vagyunk kíváncsiak, hogy mekkora valószínűséggel halad át a részecske egy bizonyos ponton, akkor összegeznünk kell mindazon hullámokat, amelyek a pontot érintő pályákhoz tartoznak. Amikor azonban tényleg el is akarjuk végezni ezeket az összegzéseket, súlyos technikai nehézségekbe ütközünk. Megkerülésükre csupán egy megoldás kínálkozik: azoknak az eseményeknek megfelelő hullámokat kell összegezni, amelyek nem a "valós" időben - abban" amit önök és én is érzékelünk -, hanem a képzetesnek nevezett időben érvényesek. A képzetes idő fogalmának eléggé sci-fi íze van, holott nagyon is jól definiált matematikai fogalmat takar. Vegyünk egy valós számot, és szorozzuk meg önmagával. Az eredmény pozitív szám lesz.

[Így például 2 x 2 = 4, és ugyanígy (- 2) x (- 2) = 4]. Léteznek azonban különleges számok is, amelyek önmagukkal megszorozva negatív számot adnak, ezeket nevezzük képzetes számoknak. (Ha például az i-vel jelölt számot önmagával szorozzuk az eredmény -1 lesz. Hasonló módon, 2i x 2i = - 4, és így tovább.) A Feynman eseményösszegzéseivel kapcsolatos nehézségek elkerülése végett a képzetes idő használatához kell folyamodnunk. Azt is mondhatjuk, hogy a számítások lehetővé tételéhez az időt nem valós, hanem képzetes számokkal kell mérnünk. Ennek érdekes hatása van a téridőre: megszűnik a tér és az idő közötti különbség.

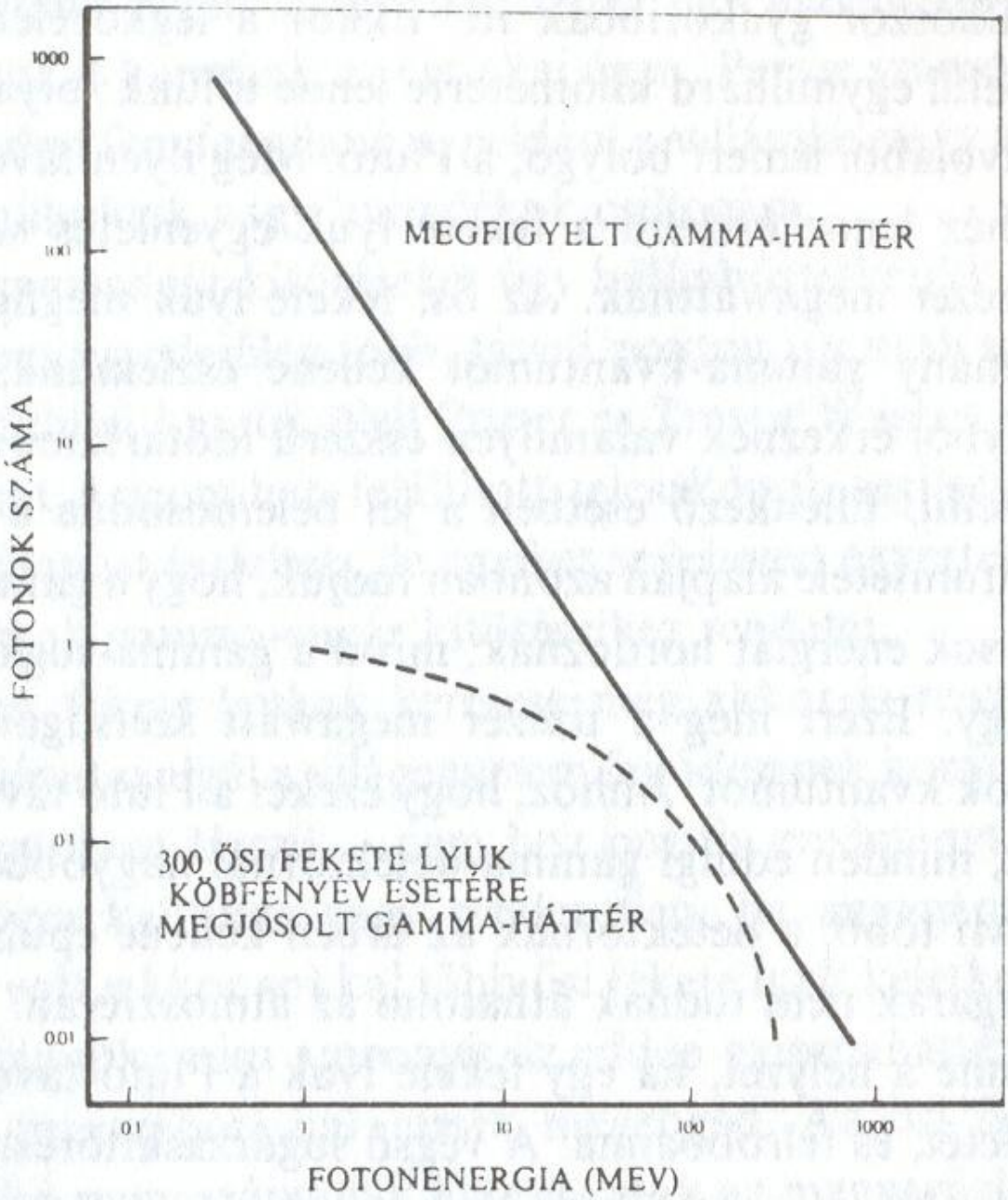
Az olyan téridőt, ahol az események időkoordinátájának képzetes értéke van, eukleidészinek nevezzük, az ókori görög tudós, Eukleidész emlékére, aki megvetette a kétdimenziós felületek geometriájának az alapjait. Nagyon hasonló ehhez az is, amit ma eukleidészi téridőnek hívunk; a különbség annyi, hogy itt kettő helyett négy dimenzió van. Az eukleidészi téridőben nincs különbség az idő iránya és a térirányok között. A valós téridőben viszont, ahol az eseményeket a hagyományos, valós időkoordináta jellemzi, szembeszökő a különbség: a tér iránya minden pontban a fénykúpon belül van, a térbeli irányok pedig azon kívül. A hétköznapi kvantummechanika szempontjából elegendő, ha a képzetes idő és az eukleidészi téridő használatát mindössze a valós téridővel kapcsolatos számítások elvégzésére szolgáló matematikai eszköznek (vagy trükknek) tekintjük. Úgy véljük, bármely egyetemleges elmélet másik mozzanata Einstein tétele lesz arról, ahogy a gravitációs mező a görbült téridőben jelentkezik: a részecskék a görbült térben az egyenesnek leginkább megfelelő pályát követik, mivel azonban a téridő nem sík, a pályák elhajolnak, mintha hatna rájuk a gravitációs tér. Ha Feynman eseményösszegzéseit Einstein gravitációról alkotott elképzeléseire alkalmazzuk, a részecske pályájának az egész világegyetem történetét reprezentáló teljes görbült téridő felel meg. Az esemény-összegzések elvégzésével kapcsolatos nehézségeket elkerülendő, a görbült téridőket eukleidészi ként kell kezelni. Az idő tehát képzetes, és nem különböztethető meg a térbeli irányoktól. Ha ki akarjuk számolni, hogy mekkora valószínűséggel találunk valamely speciális sajátsággal jellemezhető téridőt, például olyant, ami mindenhonnan ugyanolyannak látszik, akkor összegeznünk kell ilyen tulajdonsággal rendelkező eseményekhez rendelt hullámokat.

A klasszikus általános relativitáselméletben rengeteg különféle, megengedett, görbült téridő szerepel. Mindegyik a világegyetem egy-egy kiindulási állapotának felel meg. Ha ismerjük a kezdeti állapotot, a világegyetem egész történetét ismerjük. A gravitáció kvantumelméletében, ehhez hasonlóan, a világegyetem számos különféle kvantum állapota létezik. S ha tudjuk, hogyan viselkedtek az eukleidészi görbült téridők a korai idők eseményei során, akkor ismerjük a világegyetem kvantumállapotát.

A gravitáció klasszikus, a valós téridőn alapuló elméletében a világegyetem csak kétféleképpen viselkedhet: vagy végtelen régóta létezik, vagy pedig valamely véges idővel ezelőtt szingularitásban kezdődött. A gravitáció kvantumelmélete szerint viszont a harmadik lehetőség is felmerül. Mivel eukleidészi téridőket használunk, amelyekben az időirányt egy kalap alá vehetjük a térbeli irányokkal, elképzelhető, hogy a téridő kiterjedése véges, és még sincs határt vagy peremet képező szingularitása. Olyan lenne az ilyen téridő, mint a Föld felszíne, csak éppen még két dimenziója volna. A Föld felületének kiterjedése véges, határa vagy pereme azonban nincsen: nem esünk le a peremről, nem ütközünk szingularitásba, ha belehajózunk a naplementébe. (Tudom, mert már megkerültem a világot!) Ha az eukleidészi téridő a végtelen képzetes időkig nyúlik vissza, vagy szingularitással kezdődik valamely képzetes időpontban, akkor a világegyetem kezdeti állapotának definiálásakor ugyanazzal a problémával találjuk szembe magunkat, mint a klasszikus elméletnél: Isten tudhatja, hogyan született a világegyetem, mi azonban semmiképpen sem tudjuk indokolni, miért részesítjük előnyben ezt vagy azt a lehetőséget.

A gravitáció kvantumelmélete viszont új lehetőséget tárt fel, amelyben a téridőnek nincs határa, így szükségtelen a határon tanúsított viselkedésről beszélni. Nincs tehát szingularitás, ahol csődöt mondanak a tudomány törvényei, nincs a téridőnek pereme, ahol kénytelenek lennénk Istenhez folyamodni vagy definiálni a téridő viselkedését a határon. Kijelenthetjük: "A világegyetem határfeltétele az, hogy nincs határa". A világegyetem tökéletesen önálló, semmi rajta kívülálló

tényező sem befolyásolja. A világegyetem nem teremtődik és nem enyészik el. A világegyetem egyszerűen csak VAN. A korábban már említett vatikáni konferencián terjesztettem be először elképzelésemet, hogy a tér és idő esetleg olyan együttes felületet alkot, amelynek mérete véges, de nincs határa vagy pereme. Dolgozatom erősen matematikus jellegű volt, ezért Istennek a világegyetem teremtésében játszott szerepére vonatkozó súlyos

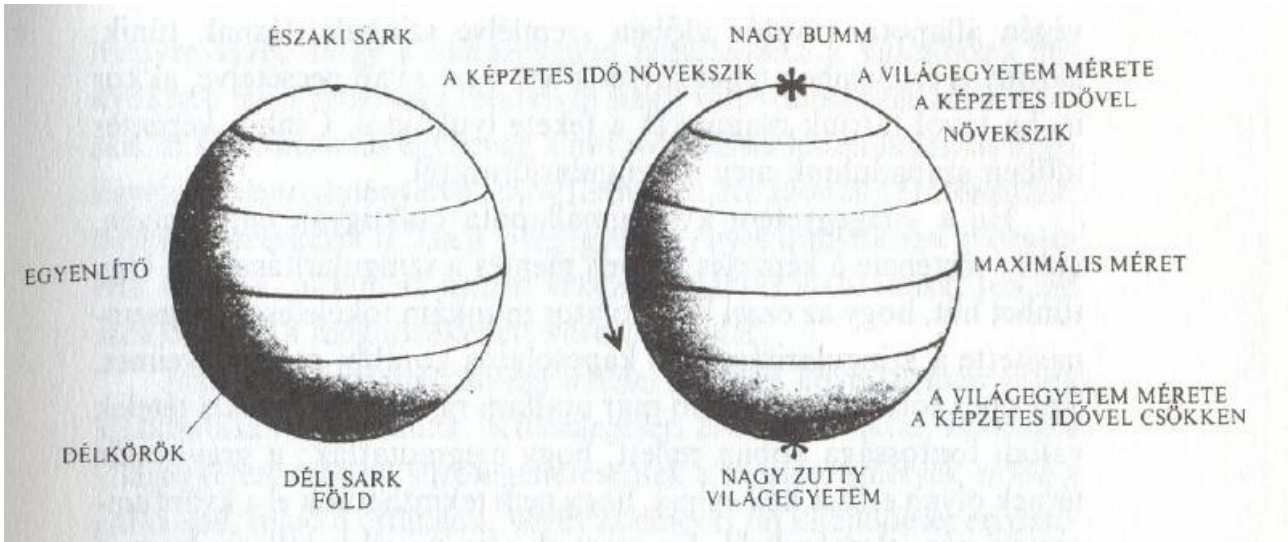


7.5 ÁBRA

következtetéseimet általában nem ismerték fel (szerencsémre). A vatikáni konferencia idején még nem tudtam, hogyan használhatnám a "határtalanság" elgondolását a világegyetemről szóló megfontolásokban. A következő nyarat viszont a Kaliforniai Egyetemen töltöttem, Santa Barbarában. Ottani barátommal és kollégámmal, Jim Hartle-lal kidolgoztuk azokat a feltételeket, amelyeket a világegyetemnek teljesítenie kell, ha a téridőnek nincs határa. Miután visszatértem Cambridge-be, munkámat két végzős diákommal, Julian Luttrellel és Jonathan Halliwellel

folytattam. Hangsúlyozni szeretném, hogy a tér és idő határtalanságára vonatkozó elképzelésem csak javaslat: nem vezethető le más elvekből. Mint bármely más tudományos teóriát, ezt is elő lehet terjeszteni esztétikai vagy metafizikai alapokon, de igazi próbáját az jelenti, ha a tapasztalatokkal egyező előrejelzéseket szolgáltat. A kvantumgravitáció esetében azonban ez két okból is nehéz. Először is, ahogy a következő fejezetben kitérek rá, egyelőre nem vagyunk biztosak benne, hogy pontosan milyen elmélet egyesíti majd sikeresen az általános relativitáselméletet és a kvantummechanikát, bár elég sokat tudunk arról, hogy milyen formát kell az ilyen egyesített elméletnek öltenie! Másodszor, a világegyetem egészét részleteiben leíró modellek egytől egyig sokkal bonyolultabbak annál, hogysem pontos előrejelzések kiszámítására használhatnánk őket. Kénytelenek vagyunk egyszerűsítő feltevésekhez és közelítésekhez folyamodni és még így is félelmetes problémát jelent az előrejelzések kihámozása.

Az eseményösszegzésekben szereplő események nem csupán a téridőt írják le, hanem minden mást is, ami abban található, például az emberi lényekhez hasonló, bonyolult szervezeteket, akik meg tudják figyelni a világegyetem történetét. Ez az antropikus elv újabb igazolásaként szolgálhat: ha az összes esemény egyaránt lehetséges, akkor mindaddig, míg az egyik eseményben létezünk, az antropikus elvvel megmagyarázhatjuk, hogy miért éppen ilyennek látjuk a világegyetemet. Tisztázatlan, hogy milyen jelentést tulajdonítsunk azoknak az eseményeknek, amelyekben nem létezünk. A gravitáció kvantumelméletének ez a szemlélete sokkal kielégítőbb lenne, ha kimutathatnánk, hogy az eseményösszegzések alapján világegyetemünk nem csupán a lehetséges események, hanem a legvalószínűbb események



8.1 ÁBRA

egyike. Evégett az összes lehetséges, eukleidészi, határral nem rendelkező téridőre el kell végeznünk az eseményösszegzést. Hamar kiderül, hogy a határnélküliség feltételéhez ragaszkodva a világegyetem elhanyagolható valószínűséggel követi a lehetséges események többségét. Létezik azonban az események egy csoportja, amely sokkal valószínűbb a többinél. Ezeket az eseményeket úgy is tekinthetjük, mintha a Föld felszínét alkotnák, ahol az Északi Sarktól mért távolságuk a képzetes időt képviseli, a sarkponttól állandó távolságra rajzolható körök mérete pedig a világegyetem térbeli kiterjedésének felel meg. A világegyetem az Északi Sarknál, egyetlen pontból indul. Dél felé haladva a körök átmérője nőttön nő, mint ahogy a világegyetem is mind jobban tágul a képzetes időben (8.1 ábra). Maximális méretét az Egyenlítőnél éri el, innen kezdve a képzetes idő növekedésével zsugorodik, míg a Déli Sarkon ismét egyetlen pont lesz a mérete. Habár a két sarkon a világegyetem kiterjedése nulla, ezek a pontok nem alkotnak szingularitást, mint ahogy a Föld Északi és Déli Sarkán sincs szakadás. Valós időben ettől merőben eltérően fest a világegyetem története. Tíz- vagy húszmilliárd évvel ezelőtt minimális volt a mérete.

A későbbiekben a világegyetem a Linde által bevezetett inflációs modell szerint tágulhat (ezúttal

azonban nem szükséges feltételezni, hogy a világegyetem valamilyen sajátos állapotban keletkezett). Tágulása során igen nagy méretet ér el, majd zsugorodni kezd; ennek végén állapota a valós időben szemlélve szingularitásnak tűnik. Bizonyos értelemben tehát sorsunk így is meg van pecsételve, akkor is, ha távol tartjuk magunkat a fekete lyukaktól. Csak a képzetes időben szabadulunk meg a szingularitásoktól. Ha a világegyetem kvantumállapota csakugyan éppen ilyen, akkor története a képzetes időben mentes a szingularitásoktól. Úgy tűnhet hát, hogy az ezzel kapcsolatos munkám tökéletesen megsemmisítette a szingularitásokkal kapcsolatos korábbi eredményeimet.

Szó sincs róla. Mint fentebb már utaltam rá, a szingularitási tételek valódi fontossága abban rejlett, hogy megmutatták: a gravitációs térnek olyan erőssé kell válnia, hogy nem tekinthetünk el a kvantumgravitációs jelenségektől. Ez vezetett arra az elképzelésre, hogy a világegyetem a képzetes időben véges lehet anélkül, hogy szingularitásokat vagy határokat tulajdonítanánk neki. A fekete lyukba zuhanó űrhajós sorsa mit sem változik; csak akkor úszná meg a találkozást a szingularitással, ha képzetes időben élne.

Ebből akár arra is következtethetnénk, hogy az állítólagos képzetes idő az igazi, amit pedig valósnak hívunk, az csupán képzeletünk kitalációja. A valós időben a világegyetemnek szingularitásoknál van kezdete és vége, ezek a pontok a téridő határát képezik, és ott a tudomány törvényei érvényüket vesztik. A képzetes időben ezzel szemben nincsenek szingularitások. Elképzelhető hát, hogy a képzetesnek nevezett idő az alapvetőbb, míg a valóságnak nevezettet csupán azért találtuk ki, hogy könnyebben leírhassuk, milyennek is gondoljuk a világegyetemet. Az 1. fejezetben vázolt megközelítés szerint viszont a tudományos elmélet csupán matematikai modell, amit megfigyeléseink leírására használunk, s mint ilyen, csak elménkben létezik. Értelmetlen lenne hát feltenni a kérdést: melyik idő a "valós" vagy a "képzetes"? Kizárólag arról van szó, hogy melyikkel lesz eredményesebb a leírásunk.

A határtalansági feltétellel együtt arra is használhatjuk az eseményösszegzéseket, hogy felderítsük: a világegyetem mely tulajdonságai bukkannak fel nagy valószínűséggel együtt. Kiszámolhatjuk például, hogy a jelenlegi sűrűség mellett mekkora valószínűséggel lesz azonos a világegyetem terjedésének sebessége a tér minden irányában. Az eddig megvizsgált egyszerűsített modellekben ez a valószínűség nagy; a határtalanság feltétele tehát arra a következményre vezet, hogy a világegyetem tágulásának a különböző irányokban mért sebessége rendkívül nagy valószínűséggel közel azonos. E következtetés egybevág a mikrohullámú háttérsugárzás megfigyelésének eredményeivel, mivel ennek szinte azonos az intenzitása, bárhonnan érkezik is. Ha a világegyetem egyes irányokban gyorsabban tágulna, akkor az onnan érkező sugárzás intenzitását tovább csökkentené a megnövekedett vöröseltolódás.

Jelenleg a határnélküliségi feltétel további következményeinek kiszámításán fáradozunk. Különlegesen érdekes a fiatal, homogén világegyetem csekély sűrűségeltéréseinek a mérete, amelyek előbb a galaxisok, majd a csillagok, végül az emberi faj kifejlődését eredményezték. A határozatlansági elv következtében a világegyetem homogenitása sosem lehetett tökéletes, mivel a részecskék sebességének és helyzetének bizonyos ingadozásokat - fluktuációkat - kellett mutatniuk. A határnélküliség feltételét felhasználva úgy találjuk, hogy a világegyetem voltaképpen a határozatlansági elv által megengedett legkevesebb egyenetlenséggel kezdett fejlődni. Ezt követően indult el az inflációs modellben is leírt gyors tágulás szakasza. E szakasz során addig erősödtek a kezdeti egyenetlenségek, míg elég nagyra nem nőttek ahhoz, hogy indokolhassák a ma körülöttünk megfigyelhető struktúrák eredetét. A táguló világegyetemben, ahol az anyag sűrűsége a különböző helyeken kismértékben eltér, a gravitáció a sűrűbb tartományokat tágulásuk lassítására, majd visszafordítására kényszeríti. A gravitáció nyomán jönnek létre a galaxisok, a csillagok és még a hozzánk, emberekhez hasonló, jelentéktelen képződmények is. Így hát a világegyetemben látható összes struktúra léte a határtalansági feltétel és a kvantummechanika határozatlansági elve révén magyarázható.

Az az elképzelés, hogy a tér és idő határtalan, zárt felületet alkothat, óriási súlyú következményeket

hordoz Istennek a világmindenség ügyeiben játszott szerepét illetően. Miután a tudományos elméletek sikeresen leírták az eseményeket, legtöbben úgy vélték: Isten engedi, hogy a világ a törvények rendszere által megkövetelt módon fejlődjék, és nem avatkozik be e törvények megsértésével.

Azt azonban nem árulják el a törvények, hogy keletkezésekor milyennek kellett lennie a világegyetemnek. Továbbra is Istenre vár, hogy felhúzza az óraművet, és döntsön a működése felől? Amennyiben a világegyetemnek van kezdete, akkor feltételezhetjük, hogy van teremtője is.

Ha azonban a világmindenség tényleg önmagába zártan létezik, nincs se határa, se pereme, akkor kezdete és vége se lehet: egyszerűen csak van. Hol van benne a Teremtő helye?

9

MERRE HALAD AZ IDŐ?

Az előző fejezetekben láthattuk, hogyan változtak az idő természetéről alkotott nézeteink az évek folyamán. Egészen a huszadik század kezdetéig az abszolút idő fogalmában hitt mindenki. Eszerint! minden esemény egyedileg felcímkézhető egy "időnek" nevezett számmal, és az összes, jól működő óra szerint azonos idő telik el két esemény között. Később azonban fölfedezték, hogy a fény sebessége minden megfigyelő számára azonos, tekintet nélkül mozgási állapotukra. Ez elvezetett a relativitáselmélethez - ebben pedig el kellett vetni az abszolút idő fogalmát. Ehelyett minden megfigyelő számára a saját órája szerint telik az idő: más-más személyek órái nem egyeznek szükségszerűen meg. Az idő tehát viszonylagos, személyes fogalommá vált, függ attól, hogy ki méri.

A gravitáció és a kvantummechanika egyesítésével próbálkozva a "képzetes" idő fogalmának bevezetésére kényszerültünk. A képzetes idő megkülönböztethetetlen a tér irányaitól. Aki északnak halad, akármikor megfordulhat, és délnek veheti útját; ugyanígy, aki előre haladhat a képzetes időben, annak képesnek kell lennie, hogy sarkon forduljon és visszafelé menjen. Nem szabad tehát érdemi különbségnek mutatkoznia a képzetes idő előre- és hátramutató iránya között.

Ha ezzel szemben a "valós" időt vesszük szemügyre, köztudottan hatalmas különbséget találunk az előre és visszafelé mutató időirányok között. Honnan ered a múlt és jövő ekkora különbsége? Miért emlékszünk a múltra, a jövőre miért nem? A tudomány törvényei nem különböztetik meg a múltat és a jövőt. Pontosabban, ahogy azt korábban érintettük, a tudomány törvényei változatlanok maradnak a C, P és T operátorok (szimmetriák) együttes hatására is. (A C a részecskék és antirészecskék cseréjét jelenti. A P felcseréli a képet és a tükörképet, tehát a jobb és bal helyet cserél. T pedig az összes részecskemozgás irányának megfordítását okozza, gyakorlatilag tehát visszafelé pergeti le a mozgást.) Az anyag közönséges körülmények közötti viselkedését szabályozó tudományos törvények a C és P operációk kombinációjának hatására is változatlanok maradnak. Más szavakkal, ugyanilyen lenne egy olyan bolygó lakóinak is az élete, akik a tükörképeink és nem anyagból, hanem antianyagból vannak.

Ha a tudomány törvényei változatlanok mind a C és P operációk, mind pedig a C, P és T operációk együttes alkalmazásaival szemben, akkor a T önmagában se változtathatja meg őket. Mégis óriási különbség van mindennapjainkban a valós idő előre- és hátramutató iránya között. Képzeljük csak el, hogy egy vizespohár leesik az asztalról és darabokra törik a padlón. Ha filmre vesszük a jelenetet, rögtön eldönthetjük, előre halad-e a film a vetítőben, vagy hátra. Az utóbbi esetben azt látjuk, hogy a földön szétszórt üvegcserepek együvé sereglenek, felemelkednek a földről és ép pohárrá alakulva visszaugranak az asztalra. Tudjuk, hogy visszafelé vetítjük a filmet, mivel ilyen viselkedéssel nem találkozunk hétköznapi életünkben. Máskülönben tönkre is mennének az edénygyárosok!

A jól ismert magyarázat szerint azért nem látjuk, hogy a széttört poharak összeragasztják magukat és visszaugranak az asztalra, mert ezt tiltja a termodinamika második főtétele. E tétel szerint ugyanis zárt rendszerek rendezetlensége, azaz entrópiája az idő múltával nő.

Olyan ez, mint Murphy valamely törvénye: a magukra hagyott dolgok egyre rosszabbul mennek. Az asztalon álló ép bögre nagyfokú rendezettséget hordoz, a földön szétszórt üvegcserép ezzel szemben rendezetlen. Könnyen eljuthatunk az asztalon álló pohártól, mint múlttól, a földön szétszórt üvegcserepekig, mint jövőig - de próbáljuk meg visszafelé!

Az entrópia vagy a rendezetlenség időbeli növekedése azt példázza, amit az idő irányítottságának vagy nyilának hívunk; olyasmiről van szó, ami a múltat megkülönbözteti a jövőtől, irányt ad az időnek. Az időnek legalább háromféle irányítottsága van, azaz három szempont is megszabhatja irányát. Legelőször is ott a termodinamikai irány, amely mentén a rendezetlenség vagy entrópia nő. A második a pszichológiai irány. Ez arrafelé mutat, amerre érzékeink szerint halad az idő; ebben az irányban a múltra emlékezünk és nem a jövőre. A harmadik pedig a kozmológiai irány. Ez az az irány, amelyben a világegyetem tágul, nem pedig zsugorodik.

E fejezetben amellett érvelek, hogy a határnélküliség feltétele és a gyenge antropikus elv együttesen megmagyarázzák, miért azonos az idő mindhárom iránya - sőt azt is, hogy miért kell egyáltalán léteznie az idő irányának. Igyekszem megmutatni, hogy a pszichológiai irányt a termodinamikai határozza meg, és ezek szükségképpen mindig egyfelé mutatnak. Ha érvényesnek tekintjük a világegyetem határnélküliségének feltételét, akkor, mint látni fogjuk, szükségszerű, hogy a termodinamika és a kozmológia megszabta irány egyértelmű legyen, de ezek nem mutatnak az univerzum teljes élettartamában mindig egyfelé. Azt is állítom azonban, hogy a körülmények csak akkor kedveznek értelmes lények létrejöttének - például olyanokénak, akik feltehetik a kérdést: "Miért növekszik a rendezetlenség az időnek ugyanabban az irányában, amerre a világegyetem tágul?" -, amikor a két irány azonos.

Először az idő termodinamika megszabta irányát vizsgáljuk meg. A termodinamika második főtétele abból a tényből következik, hogy a rendezetlen állapotok száma mindig sokkal nagyobb, mint a rendezetteké. Gondoljunk például a kép kirakós játék (puzzle) darabjaira. A darabkák egy és csakis egy elrendezésben alkotnak teljes képet. Óriási viszont azoknak az elrendezéseknek a száma, amelyekben a darabkák rendezetlenek, és nem alkotnak képet.

Tételezzük fel, hogy egy rendszer a kisszámú rendezett állapotok valamelyikében jön létre. Az idő múltával a rendszer a tudomány törvényeivel összhangban fejlődik, állapota megváltozik. Valószínűbb, hogy valamely későbbi időpontban rendezetlen állapotban találjuk, mivel ezek száma nagyobb, mint a rendezetteké. Ha tehát a rendszer kezdetben igen nagyfokú rendezettséget mutat, akkor rendezetlensége az időben növekszik.

Legyen a dobozba zárt kirakós játék darabjainak kezdeti állapota az a rend, amelyben képet alkotnak. Ha összerázzuk a dobozt, a darabok más elrendezésbe kerülnek. Valószínű, hogy ez az elrendezés szabálytalan lesz, a darabkák nem állnak össze a megfelelő képpé, egyszerűen azért, mert olyan nagy a rendezetlen állapotok száma. A darabkák egyes csoportjai itt-ott még mindig mutathatják a kép részleteit, minél inkább rázzuk azonban a dobozt, annál inkább megtörik ezeknek a részleteknek is a rendje, míg végül teljes lesz az összevisszaság, a képből nem marad semmi. Ha tehát a darabok a nagyfokú rendezettségű kezdeti állapotból indulnak, akkor rendezetlenségük az idő múlásával valószínűleg növekszik. Tételezzük fel, hogy Isten úgy döntött: a világegyetem végső állapota lesz a nagyfokú rendezettség, kiindulási állapota" viszont közömbös. A korai időszakokban a világegyetem valószínűleg rendezetlen lesz. Ez azt jelenti, hogy a rendezetlenség csökkenné az idővel. Észlelhetnénk, hogy törött üvegpoharak összeragadnak és felugranak az asztalra. Az ezt észlelő emberi lény azonban olyan világegyetemben élne, ahol a rendezetlenség csökken az idővel. Bebizonyítom, hogy az ilyen lények idejének pszichológiai iránya visszafelé mutat. Ők tehát az eljövendő eseményekre emlékeznek, nem pedig a múltjukban történtekre. Ha a pohár törött, emlékeznek rá, hogy az asztalon a helye, az ép pohár esetében viszont nem tudnák, hogy nemrég még a földön volt.

Meglehetősen nehéz az emberi emlékezetről beszélni, mivel agyunk működését még nem ismerjük részletesen. Mindent tudunk viszont a számítógépek memóriájáról. Én tehát a továbbiakban a számítógépek pszichológiai idő-irányáról beszélek. Ésszerűnek vélem a feltételezést, hogy ez

ugyanarra mutat, amerre az embereké. Ha nem így lenne, micsoda tarolást végezhetnénk a tőzsdén egy olyan komputer segítségével, amelyik a holnapi árfolyamokra emlékszik!

A számítógép memóriájául szolgáló eszköz tulajdonképpen két állapot bármelyikének felvételére alkalmas elemekből áll. Kézenfekvő példa erre a golyós számológép, az abakusz. Ennek legegyszerűbb formája néhány drótszál, rajtuk egy-egy golyóval, amiket két helyzet egyikébe tolhatunk. A számítógép memóriája rendezetlen állapotban van, mielőtt beleírnánk valamit; mindkét megengedett állapot egyforma valószínűséggel fordul elő. (Az abakusz golyói összevissza csúszkálnak a huzalokon.) Miután a memória kölcsönhatásba kerül a megjegyzésre szánt rendszerrel, az elemek egyértelműen vagy az egyik, vagy a másik állapotba kerülnek, a rendszer követelményeinek megfelelően. (Az abakusz mindegyik golyója vagy a drót bal szélén, vagy a jobb szélén található.) A memória tehát a rendezetlen állapotból rendezett állapotba kerül. A kívánt állapot előállításához azonban bizonyos energiamennyiséget kell felhasználnunk (meglökjük a golyókat, áramot vezetünk a számítógép tápegységébe). Ez az energia hő formájában sugárzódik szét, ami a világegyetem rendezetlenségét növeli. Kimutatható, hogy a rendezetlenség növekedése mindig meghaladja a memória rendjének növekedését. A számítógép hűtőventilátora által kihajtott hő tehát azt jelenti, hogy minden egyes tétel megjegyzése után tovább nő a világegyetem összes rendezetlensége. A számítógép tehát ugyanabban az időirányban emlékszik a múltra, amelyikben a rendezetlenség növekszik.

Szubjektív időérzékelésünk irányát, tehát a pszichológiai-időirányt agyunk belsejében az idő termodinamikai iránya határozza meg. Akár a számítógépek, csak olyan időirányban emlékezhetünk, amelyben az entrópia növekszik. Emiatt a termodinamika második főtétele szinte közhellyé válik. A rendezetlenség növekszik az idővel, mivel mi abban az irányban mérjük az időt, amelyben a rendezetlenség növekszik. Ennél biztosabb tétre már nem is fogadhatnánk! De miért kell egyáltalán léteznie az idő termodinamikai irányának? Másképpen megfogalmazva, miért kell a világegyetem általunk múltnak nevezett végén olyan nagyfokú rendnek lennie? Miért nem marad állandóan teljesen rendezetlen? Hiszen ez látszana valószínűbbnek. És miért abban az időirányban nő a rendezetlenség, amelyben a világegyetem tágul? A klasszikus általános relativitáselmélet szerint nem mondhatunk semmit a világegyetem keletkezéséről, mivel a Nagy Bumm szingularitásánál a tudomány összes ismert törvénye érvényét veszti.

A világegyetem nagyon sima, rendezett állapotban is megszülethetett. Ebből aztán kialakulhattak az idő jól definiált, termodinamikai és kozmológiai irányai, összhangban megfigyeléseinkkel. Ugyanígy azonban rögös és rendezetlen állapotban is létrejöhetett. Ekkor viszont a világegyetem már a teljes rendezetlenség állapotában lenne, a rendezetlenség tehát nem nőne az idővel. Vagy állandó maradna, mikor is a termodinamikai időirány nem lehetne jól definiált, vagy pedig csökkenne, ekkor pedig a termodinamikai iránya kozmológiaival ellentétes lenne. E lehetőségek egyike sem felel meg tapasztalatainknak. Természetesen, mint ahogy már láttuk, a klasszikus általános relativitáselmélet meg is jósolja saját bukását. Ha a téridő görbülete megnő, a kvantumgravitációs hatások jelentőssé válnak és a klasszikus elmélet nem írja le többé megfelelően a való világot. A világegyetem megszületésének megértéséhez a gravitáció kvantumelméletét kell használnunk.

Mint az előző fejezetben láttuk, ha a gravitáció kvantumelmélete alapján kívánjuk jellemezni a világegyetemet, akkor is ismernünk kell a világegyetem lehetséges eseményeinek viselkedését a téridő múltjának határán. Ezt nem tudjuk és nem is tudhatjuk; az ebből fakadó nehézséget csak akkor küzdhetjük le, ha az események kielégítik a határtalansági feltételt: valamennyien véges kiterjedésűek, de határuk, peremük, élük vagy szingularitásuk nincs. Ebben az esetben a világegyetem kezdete a téridő szabályos, sima pontja lesz, s a tágulás nagy mértékben sima, rendezett állapotból indul. Teljes homogenitásról nem lehet szó, mivel az sértené a kvantumelmélet határozatlansági elvét. A részecskék sebességének és sűrűségének kismértékű fluktuációja elkerülhetetlen. A határtalansági feltétellel mindazonáltal az is együtt jár, hogy e fluktuációk olyan kicsinyek, amennyire csak a határozatlansági elv engedi.

A világegyetem fejlődése exponenciálisan, "inflációsan" táguló szakasszal kezdődhetett, ennek során méretét alaposan megsokszorozta. A tágulás folyamán a sűrűségfluktuációk kezdetben kicsinyek maradtak, lassanként azonban növekedésnek indultak. Az átlagosnál valamivel nagyobb sűrűségű tartományok tágulását a többlet tömeg gravitációja lelassította. E tartományok előbb-utóbb abba is hagyták a tágulást, és zsugorodni kezdtek; galaxisok, csillagok és magunkfajta lények alakultak ki belőlük. A világegyetem tehát nagyon sima, rendezett állapotban kezdődhetett, és fejlődése során válhatott darabossá, rendezetlenné. Mindez magyarázatul szolgálhat a termodinamikai időirány létezésére.

Mi történik azonban, ha, illetve amikor, a világegyetem abbahagyja a tágulást és zsugorodni kezd? Visszájára fordul-e a termodinamikai irány, csökken-e a rendezetlenség az idővel? Ha így lenne, mindenféle sci-fibe illő lehetőség nyílna meg azok számára, akik túlélik a táguló szakasz átváltozását összehúzódóvá. Láthatnák, amint a törött üvegpohár cserepei felszedelőzködnek, és a padlóról visszaugranak az asztalra? Emlékeznek majd a holnapi árfolyamokra, és hatalmas vagyonra tesznek szert a tőzsdén? A világegyetem összeomlásával kapcsolatos aggályok akadémikus jellegűnek tűnhetnek, hiszen erre még legalább tízmilliárd évig nem kerül sor.

A kíváncsiak azonban hamarabb is válaszhoz juthatnak: elég, ha fejest ugranak a legközelebbi fekete lyukba. A csillag összeomlása és fekete lyukká válása sok tekintetben hasonló a világegyetem összeomlásának végső szakaszához. Ha tehát a rendezetlenség csökken a világegyetem összehúzódó szakaszában, akkor elvárhatjuk, hogy ezt tegye a fekete lyuk belsejében is. Lehet, hogy a fekete lyukba zuhanó űrhajós vagyont keres ruletten, mivel emlékszik rá, hova fog gurulni a golyó, mielőtt még megtenné tétjét. (Milyen kár, hogy nem sok ideje marad a játékra, mivel egy-kettőre spagettivé nyúlik. Arra se lesz módja, hogy tudassa velünk tapasztalatait a termodinamikai időirány megfordulásáról, vagy hogy felvegye nyereségét: csapdába esne a fekete lyuk eseményhorizontja mögött.) Kezdetben úgy véltem, a rendezetlenség csökkenésével együtt járna a világegyetem összeomlása. Úgy gondoltam, hogy amikor ismét kicsivé válik, vissza kell térnie sima és rendezett állapotába. Olyan lenne emiatt az összehúzódási szakasz, mintha visszafordítanánk a tágulási szakasz idejét. Az emberek visszafelé élnék le életüket: születésük előtt meghalnának, és a világegyetem összeomlásával párhuzamosan fiatalodnának. Ezt az elképzelést a tágulási és összehúzódási szakasz között mutatkozó csinos szimmetria teszi rokonszenvessé. Önmagában, a világegyetemről alkotott többi elmélet figyelembevétele nélkül azonban nem alkalmazhatjuk. A döntő kérdés így hangzik: tartalmazza-e a határtalansági feltétel ezt a lehetőséget, vagy összeférhetetlen vele?

Mint írtam, először úgy véltem, a határtalansági feltétel csakugyan magában foglalja, hogy az összehúzódási szakasz során csökken a rendezetlenség. Részben talán a Föld felszín évei kapcsolatos analógia is befolyásolt. Ha a világegyetem kezdetének az Északi Sarkot választjuk, akkor a végének ugyanúgy hasonlítani a kell az elejéhez, mint a Déli Sark az Északira. A két sark és az idő két végpontja közötti megfeleltetés azonban csak a képzetes időben igaz. A valós idő kezdete és vége nagy mértékben különbözhet. Ugyancsak félrevezetett az a munkám is, amit a világegyetem egy egyszerűsített modelljén végeztem; ebben az összeomlás szakasza a tágulás megfordításaként mutatkozott. Egyik kollégám azonban, Don Page a Pennsylvania Állami Egyetemről, rámutatott, hogy a határtalansági feltétel nem kívánja meg szükségszerűen, hogy az összehúzódás szakasza a tágulás időbeli fordítottja legyen. Sőt mi több, egyik tanítványom, Raymond Laflamme felismerte, hogy egy kismértékben bonyolultabb modellben a tágulás nagyon is különbözik az összehúzódástól. Fel kellett ismernem, hogy hibáztam: a határtalansági feltétel valójában azt tartalmazza, hogy a rendezetlenség az összehúzódás során is nő. Sem a világegyetem összehúzódásának kezdetén, sem a fekete lyukakban nem fordul meg a termodinamika és a pszichológia által meghatározott időirány.

Mit tegyen az ember, ha rádöbben, hogy efféle hibát követett el? Egyesek sose ismerik el tévedésüket, mindent megtesznek, hogy újabb, és esetleg egymásnak is ellentmondó érvekkel támasszák alá eredeti állításukat. Ezt tette Eddington a fekete lyukak elméletével kapcsolatban. Mások kijelentik, hogy már eredetileg sem támogatták komolyan a helytelen nézetet, s ha mégis megtették, az csak azért történhetett, hogy rámutassanak ellentmondásos voltára. Számomra sokkal

tisztábbnak és jobbnak tűnik, ha az ember nyomtatásban is elismeri, hogy tévedett. Jól példázza ezt Einstein magatartása: annak idején, amikor a világegyetem statikus modelljének megalkotásán fáradozott, bevezette a kozmológiai konstanst; ezt később élete legnagyobb hibájának nevezte. Az idő irányítottságára visszatérve, fennmarad a kérdés: miért tapasztaljuk, hogy a termodinamikai és a kozmológiai idő iránya egyfelé mutat? Másként megfogalmazva, miért nő a rendezetlenség ugyanabban az irányban, mint amerre a világegyetem tágul? Ha a határtalansági feltétellel összhangban elfogadjuk, hogy a világegyetem előbb tágul, majd ismét összehúzódik, akkor a kérdés így hangzik: miért a táguló, és miért nem az összehúzódó szakaszban élünk?

E kérdésre a gyenge antropikus elv alapján válaszolhatunk. A világmindenség összehúzódásának időszakában a körülmények alkalmatlanok olyan intelligens lények létezéséhez, akik képesek föltenni a kérdést: "Miért nő a rendezetlenség ugyanabban az időirányban, amelyben a világegyetem tágul?" A világegyetem korai szakaszának inflációs tágulása, ami a határtalansági elmélet következménye, azt eredményezi, hogy a tágulás sebessége közel kritikus, azaz éppen elegendő az összeomlás elkerüléséhez. Következésképpen elég sokáig nem fog összeomlani. Addigra rég kiég a csillagok üzemanyaga, protonjaik és neutronjaik könnyű részecskékké és sugárzássá alakulnak. A világmindenség tehát a csaknem teljes rendezetlenség állapotában lesz. A termodinamikai irány nem lesz különösebben erős. A rendezetlenség alig-alig nőhet majd, hiszen a világegyetem már csaknem tökéletesen rendezetlen lesz. Az értelmes lények létezéséhez viszont elengedhetetlen, hogy a termodinamikai irány egyértelmű legyen. Az életben maradáshoz az értelmes lényeknek ételt kell fogyasztaniuk, mely az energia rendezett formája; az elfogyasztott táplálék pedig hővé alakul, ami az energia rendezetlen formája. Az értelmes élet számára tehát nem nyílik tér a világegyetem összehúzódásának időszakában. Ezért észleljük úgy, hogy a termodinamikai és a kozmológiai idő ugyanabban az irányban halad. Nem arról van szó, hogy a világegyetem tágulása a rendezetlenség növekedését eredményezi. A, határtalanság feltétele miatt nő a rendezetlenség, és ugyancsak emiatt az értelmes élet számára csak a világegyetem táguló szakaszában nyílik tér. Összefoglalva: a tudomány törvényei nem különböztetik meg az idő előre- és visszafelé mutató irányait. Mégis létezik legalább három időirány, amelyek megkülönböztetik a múltat a jövőtől.

A termodinamika által megszabott irány esetében a rendezetlenség nő és nem csökken. A másik a pszichológiai irány, ebben az irányban a múltra és nem a jövőre emlékezünk. Végül a harmadik, a kozmológiai irány arrafelé mutat, amerre a világegyetem tágul, nem pedig zsugorodik. Megmutattam, hogy a pszichológiai irány alapvetően megegyezik a termodinamikaival, ezek ketten tehát mindig egyfelé mutatnak. A határtalansági feltétel azt jósolja, hogy léteznie kell jól definiált termodinamikai iránynak, mivel a világegyetemnek sima, rendezett állapotból kellett kiindulnia. S azért észlelhetjük, hogy ez egybeesik a kozmológiai iránnyal, mert értelmes lények csak a táguló szakaszban létezhetnek. Az összehúzódás szakasza az életre alkalmatlan lesz, mivel ekkor a termodinamikai irány ehhez nem elég kifejezett. Az emberi faj által a világegyetem megértésében elért fejlődés a rend pici zugát hozta létre az egyre rendezetlenebb világegyetemben. Ha Ön, az olvasó e könyv minden szavára emlékszik, akkor mintegy kétmillió információdarabkát rögzített a memóriája; agyának rendezettsége ezzel a kétmillió egységgel nőtt. A könyv olvasása közben azonban étel formájában legalább ezer kalória rendezett energiát alakított rendezetlen hőenergiává, melyet hővezetés és verítékezés révén a levegőben szórt szét. Ez a hőenergia a világegyetem rendezetlenségét mintegy húsz millió millió millió millió egységgel növelte. Ha tehát minden szóra emlékszik a könyvből, akkor a növekmény tíz millió millió milliószoros. A következő fejezetben megkísérlem, hogy tovább növeljem eldugott kuckónkban a rendet: igyekszem elmagyarázni, hogyan próbálják a szakemberek összeállítani az eddig bemutatott részleges elméleteket egy teljes, egyesített elméletté, amely a világegyetem minden aspektusára kiterjedhetne.

10

A FIZIKA EGYESÍTÉSE

Az első fejezetben már említettem, milyen rettenetesen nehéz volna egyetlen nekifutásra megalkotni

a világegyetem összes jelenségére érvényes, teljes, egyesített elméletet. A haladás érdekében ehelyett inkább az események korlátozott leírására alkalmas részleges elméleteket keresünk, miközben számos más jelenséget elhanyagolunk vagy számértékekkel helyettesítünk. (A kémia például lehetővé teszi, hogy kiszámítsuk az atomok kölcsönhatásait, anélkül, hogy ismernénk az atommag belső szerkezetét.) Végső célunk persze továbbra is a teljes körű, egyesített, ellentmondásmentes elmélet meglelése, olyané, amely közelítésként tartalmazza az összes részleges elméletet, és amelyet nem szükséges bizonyos önkényes számértékek bevezetésével a tényekhez illesztgetni.

Az ilyen elmélet kutatását célzó erőfeszítéseket nevezik "a fizika egyesítésének". Einstein is egy ilyen elmélet keresésének szentelte utolsó éveit, eredménytelenül: az idő nem érett még meg, hiszen léteztek ugyan a gravitáció és az elektromágnesség leírására szolgáló részleges elméletek, de nagyon keveset tudtunk a nukleáris erőkről. Einstein a kvantummechanika realitását is elutasította, holott létrejöttében ő maga is jelentős szerepet játszott. Mégis úgy látszik, a határozatlansági elv világegyetemünk egyik alapvető vonása. A sikeres egyesített elméletnek tehát szükségképpen ezt az elvet is magában kell foglalnia.

Mint az alábbiakban megmutatom, a világegyetemről szerzett bőséges ismereteinknek hála, ma sokkal jobb esélyekkel indulunk egy ilyen elmélet keresésére. Óvakodnunk kell azonban a túlzott magabiztosságtól - nem egy hamis hajnalt üdvözöltünk már. Századunk elején például általános volt a vélekedés, hogy az oszthatatlan anyag tulajdonságai, például a rugalmasság és a hővezetés révén mindent meg tudunk magyarázni. Az atomszerkezet és a határozatlansági elv felfedezése látványosan véget vetett ennek a hitnek. 1928-ban pedig a Göttingeni Egyetem Nobel-díjas fizikusa, Max Born egy látogatócsoport előtt kijelentette: "Amit ma fizikának nevezünk, hat hónapon belül lezárt tudománnyá válik". Magabiztosságát Dirac friss fölfedezésére alapozta: az elektron viselkedését leíró egyenletre.

Mindenki azt várta, hogy hasonló egyenlettel írhatják majd le a proton viselkedését is. Más elemi részecskét akkoriban nem ismertek, ezért már az elméleti fizika kimerülésére számítottak. A neutron és a magerők felfedezése egykettőre szétzúzta ezeket az illúziókat".

Mindennek ellenére úgy vélem, helye van az óvatos optimizmusnak: lehet, hogy a természet végső igazságainak megismerésére irányuló erőfeszítéseink az utolsó szakaszhoz közelednek. Az előző fejezetekben bemutattam az általános relativitáselméletet, a gravitáció részleges elméletét, valamint az erős, a gyenge és az elektromágneses erőket kormányzó részleges elméleteket. Az utóbbi hármat úgynevezett nagy egyesített elméletekké (GUT-okká) vonhatjuk össze, ezek azonban nem igazán kielégítőek: a gravitációt nem tartalmazzák, viszont akadnak bennük mennyiségek - például a különféle részecskék relatív tömegei -, amelyeket nem lehet az elméletből levezetni, hanem a megfigyelt tapasztalatokhoz kell illeszteni értékeiket.

A gravitáció és a többi erő egyesítésére alkalmas elmélet meglelése azért olyan borzasztóan nehéz, mert az általános relativitáselmélet "klasszikus" elmélet, azaz nem foglalja magában a kvantummechanika határozatlansági elvét. A többi elmélet viszont alapvetően függ a kvantummechanikától. Első lépésként tehát elengedhetetlen az általános relativitáselmélet kombinálása a határozatlansági elvvel. Mint láttuk, ennek figyelemre méltó következményei lehetnek.

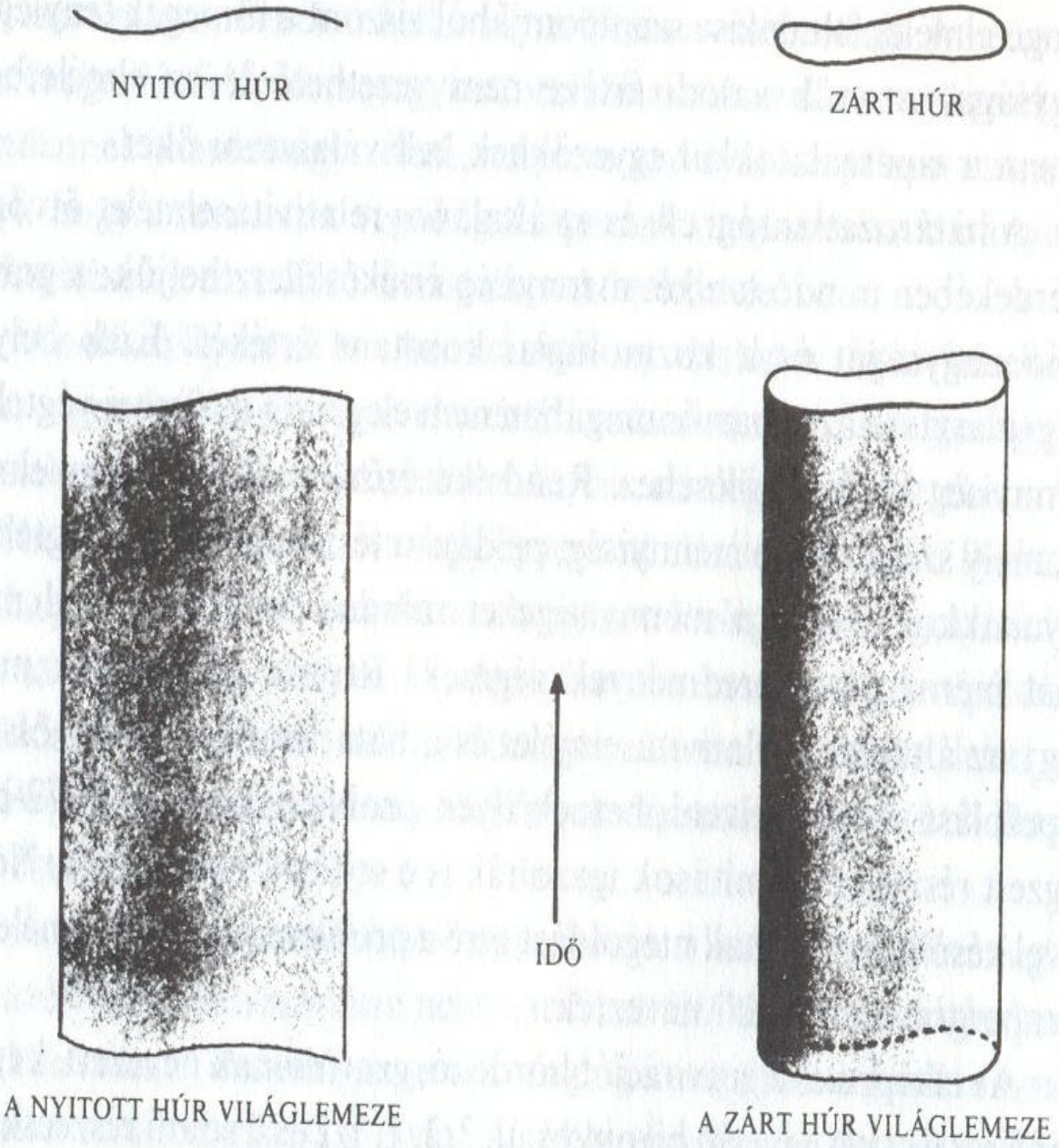
Enyhül a fekete lyukak feketesége, a világegyetem pedig nem tartalmaz szingularitásokat, hanem teljesen magába zártnak és határtalannak mutatkozik. A 7. fejezetben már kiderült, hol itt a bökkenő: még az "üres" világűrt is virtuális részecskék és antirészecskék párjai töltik tele. Ezeknek a pároknak végtelen energiával kellene rendelkezniük, ekkor pedig Einstein híres egyenlete alapján a tömegük is végtelen: E = meZ. Gravitációs vonzásuk tehát végtelen kicsiny méretűre görbítené a világegyetemet.

A többi részleges elméletben is felbukkannak ehhez hasonló, látszólag abszurd, végtelen értékek. Ezek azonban kivétel nélkül minden esetben kiküszöbölhetők az újranormálásnak nevezett

eljárással. Ilyenkor újabb végtelen mennyiségek bevezetésével szüntetjük meg az eredeti végtelen mennyiségeket. E technika matematikailag kétes értékű, mindazonáltal a gyakorlatban a jelek szerint jól beválik. Segítségükkel ezek az elméletek a tapasztalatokkal megdöbbentően jó egyezést mutató jóslatokra bizonyultak alkalmasnak. Az átfogó elmélet feltalálása szempontjából viszont a tömegek tényleges nagysága, az erők valódi értéke nem vezethető le az elméletből, hanem a tapasztalatokkal egyezőknek kell választani őket. A határozatlansági elv és az általános relativitáselmélet ötvözése érdekében mindössze két mennyiség értékét illeszthetjük: a gravitáció nagyságát és a kozmológiai konstans értékét. Ezek helyes megválasztása azonban önmagában nem elegendő az összes végtelen mennyiség kiküszöböléséhez. Rendelkezésünkre áll tehát egy elmélet, mely szerint több mennyiség, például a téridő görbülete végtelen, ugyanakkor ezeket a mennyiségeket minden további nélkül meg lehet mérni, és az eredmények végesek! Régóta gyanították már, hogy az általános relativitáselmélet és a határozatlansági elv összekapcsolása esetén felvetődhetnek ilyen problémák, és az 1972-ben végzett részletes számítások igazolták is e sejtések helyességét. Négy évvel később javasoltak megoldást erre a problémára; az új elméletet "szupergravitációnak" nevezték.

Az elképzelés a gravitációt hordozó, gravitonnak nevezett, kettes spinű részecskét egyesíti bizonyos új, 3/2,1,1/2 és 0 spinű részecskékkel. Mindezeket a részecskéket bizonyos értelemben ugyanannak a "szuperrészecskének" a különféle megjelenési formáiként tekinthetjük. Ezáltal egyesítettük az 1/2 és 3/2 spinű anyagi részecskéket a 0, 1 és 2 spinű erőhordozó részecskékkel. Az 1/2 és 3/2 spinű virtuális részecske-anti részecske párok negatív energiával rendelkeznek, amivel közömbösíthetik a 2, 1 és 0 spinű virtuális párok pozitív energiáját. Így a végtelen tényező továbbra is megmaradna. Az ennek eldöntésére végzendő számítások viszont olyan hosszadalmasnak és nehézkesnek ígérkeztek, hogy senki se volt hajlandó nekilátni és elvégezni őket. Becslések szerint még számítógéppel is legkevesebb négy évet venne igénybe a dolog, s fölöttébb valószínű, hogy legalább egy, de inkább több hiba is becsúszna. A helyes választ tehát csak akkor kapnánk meg, ha másvalaki megismételné a számításokat és ugyanarra az eredményre jutna. Ennek pedig nincs sok esélye.

A legtöbb tudós sokáig a szupergravitációban vélte fellelni a fizika egyesítésének kérdésére adandó választ, s ebben őket sem a fenti problémakör, sem az a tény nem zavarta, hogy a

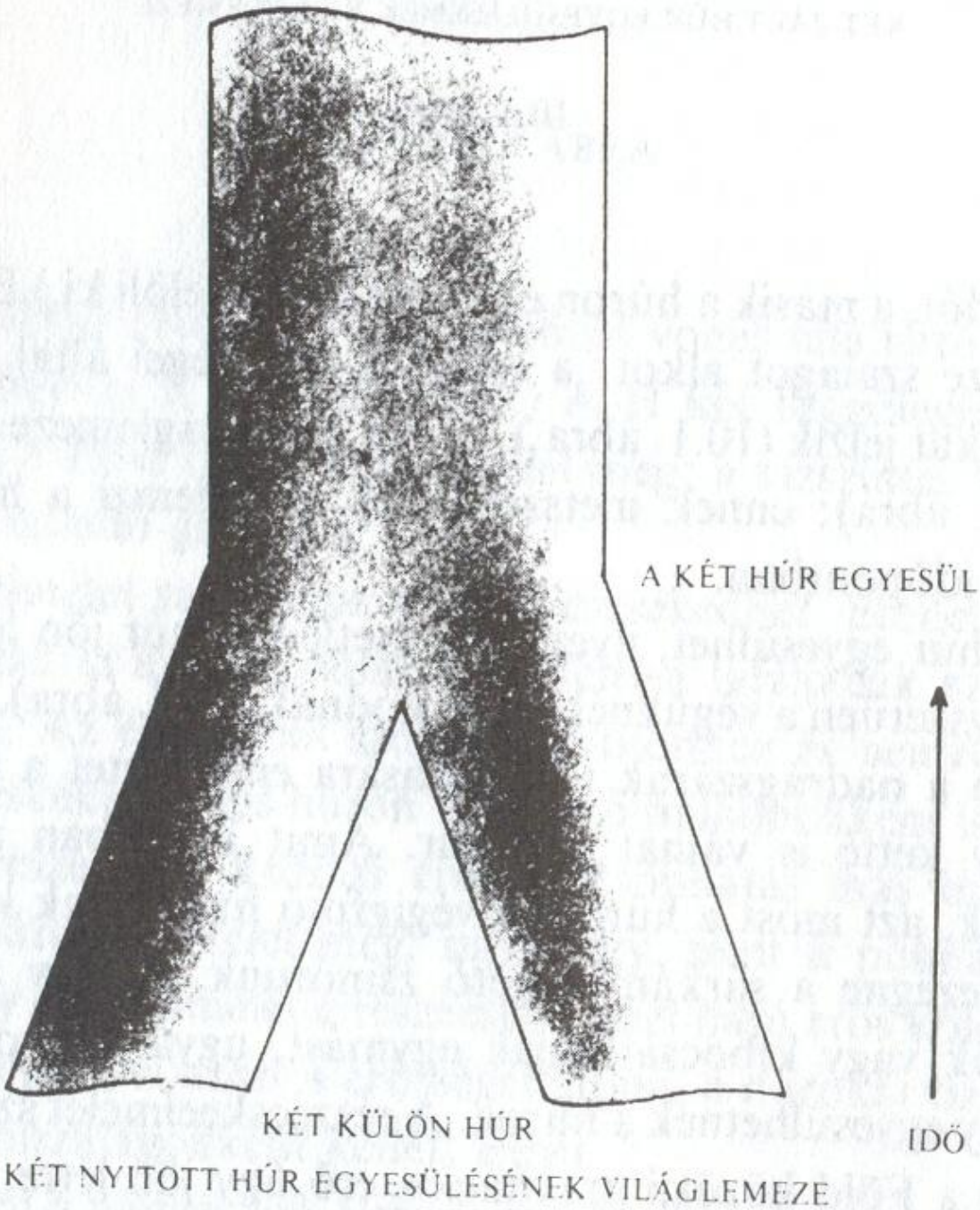


10.1 ÉS 10.2 ÁBRA

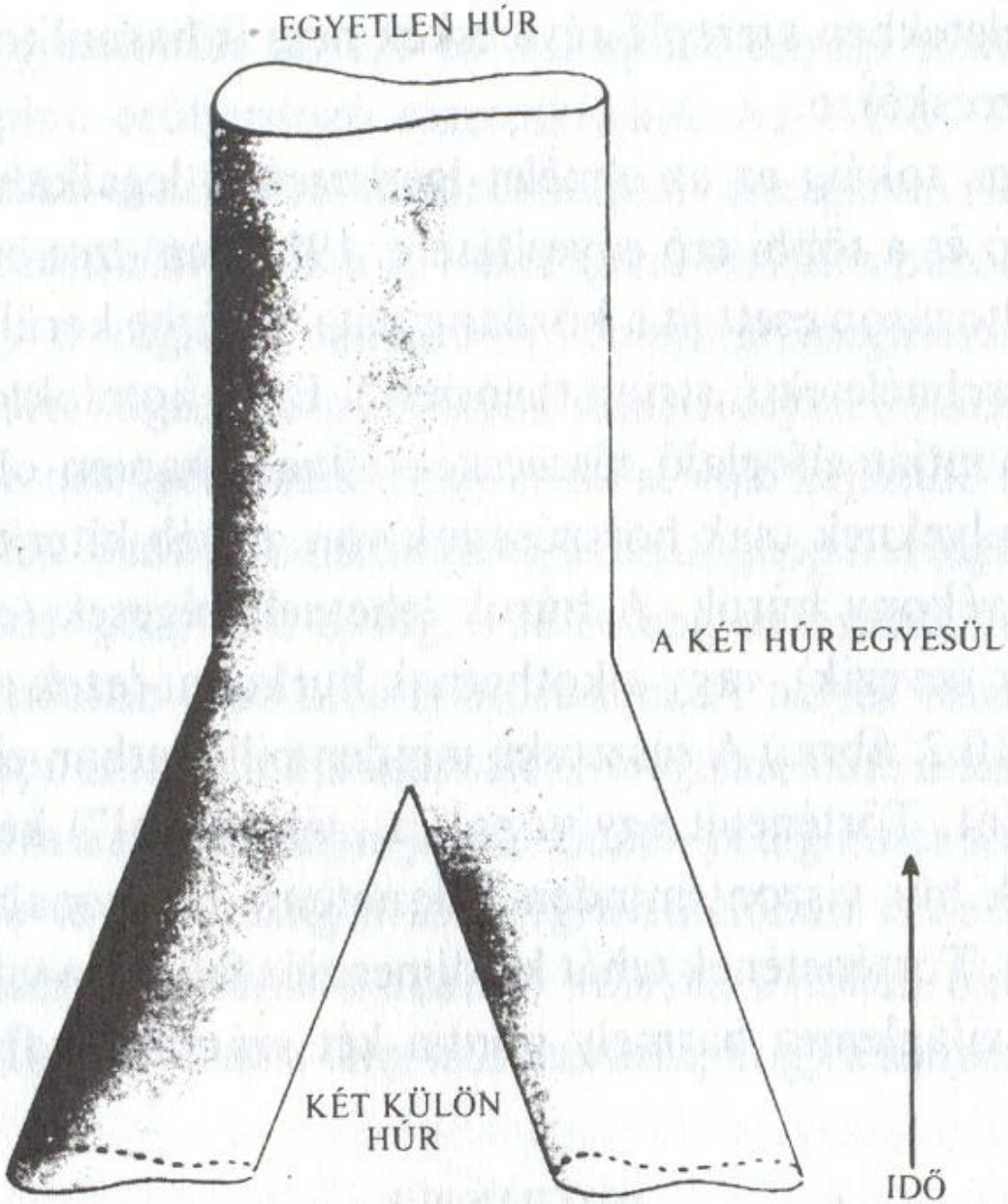
szupergravitációs elméletekben szereplő részecskék nem is hasonlítottak a megfigyelt részecskékre. Mégis sokáig ez az elmélet ígérkezett a legalkalmasabbnak a gravitáció és a többi erő egyesítésére. 1984-ben azonban figyelemre méltó változáson esett át a közhangulat: előtérbe kerültek az úgynevezett húrelméletek ("string theories"). Ezek homlokterében nem a tér egy pontját elfoglaló részecskék állnak, hanem olyan objektumok, amelyeknek csak hosszúságuk van, egyéb kiterjedésük nincs: végtelen vékony húrok. A húrok lehetnek végesek (ezeket nyitott húroknak nevezik), vagy alkothatnak hurkokat (ezek a zárt húrok).

(10.1. és 10.2. ábra.) A részecske minden pillanatban elfoglalja a tér egy pontját. Történetét egy

vonal (a "világvonal") képviseli a téridőben. A húr viszont minden pillanatban egy vonalat foglal el a téridőben. Történetének tehát kétdimenziós felület, a világlemez felel meg. (A világlemez bármely pontja két számmal adható meg: az

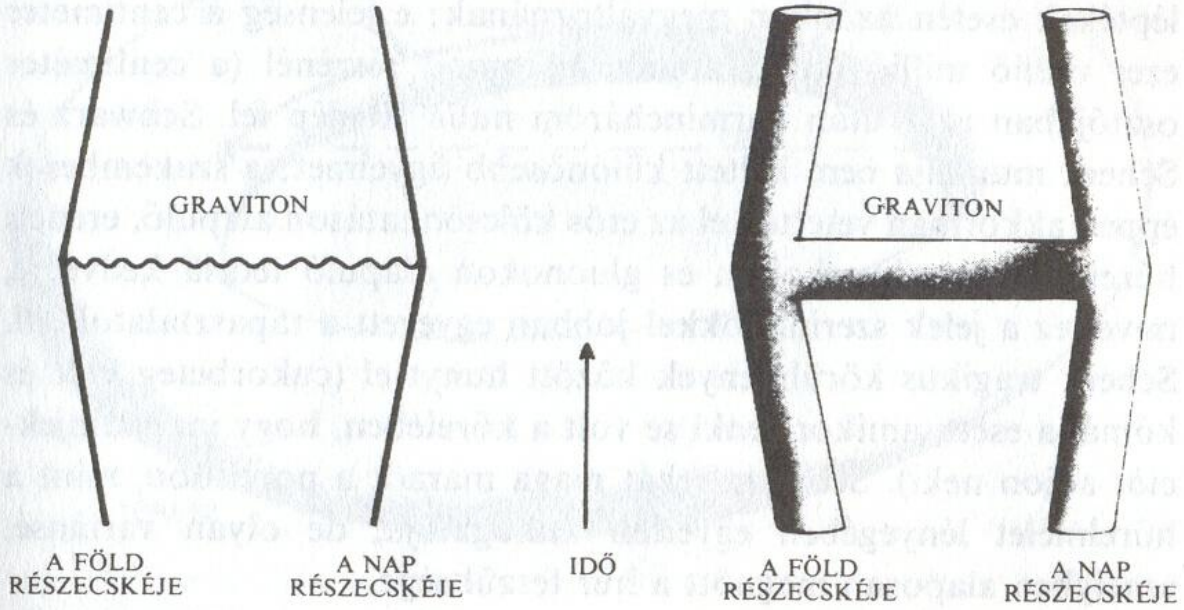


10.3 ÁBRA



KÉT ZÁRT HÚR EGYESÜLÉSÉNEK VILÁGLEMEZE

10.4 ÁBRA



10.5 ÉS 10.6 ÁBRA

egyik az időt, a másik a húron elfoglalt helyet jelöli ki.) Egy nyílt húr világlemeze szalagot alkot: a szélek a húr végei által a téridőben bejárt utakat jelzik (10.1. ábra.). A zárt húr világlemeze henger vagy cső (10.2. ábra); ennek metszete kör, ez jellemzi a húr helyzetét valamely időpontban.

Két húr egyesülhet, ilyenkor egyetlen új húr jön létre. Nyitott húrok egyszerűen a végüknél kapcsolódnak (10.3. ábra). Zárt húroknál a kép a nadrágszárak találkozására emlékeztet a (10.4. ábra).

Ugyanígy ketté is válhat egy húr. Amit korábban részecskének tartottunk, azt most a húrokon végigfutó hullámnak képzelhetjük, mintha rezegne a sárkányeregető zsinórunk. Ahogy a részecskék elnyelhetik vagy kibocsáthatják egymást, ugyanúgy osztódhatnak ketté vagy egyesülhetnek a húrok. A részecskeelmélet szerint például a Nap és a Föld közötti gravitációs erő úgy jön létre, hogy a Nap valamely részecskéje kibocsát egy gravitont, amit aztán a Föld elnyel (10.5. ábra). A húrelméletben ugyanezt H-alakú csővel jeleníthetjük meg (10.6. ábra). (Kétségkívül sok közös vonás található a vízvezeték-szerelésben és a húrelméletben.) A H két függőleges oldala a Nap, illetve a Föld részecskéinek felel meg; a vízszintes keresztrúd a közöttük haladó graviton.

A húrelmélet sajátságos múlttal dicsekedhet. Eredetileg 1964-ben dolgozták ki azzal a céllal, hogy leírást találjanak az erős kölcsönhatásra. Az elképzelés szerint a protonhoz és neutron hoz hasonló részecskéket feszes húron végigfutó hullámokként is elképzelhetjük. A részecskék közötti erős kölcsönhatás más húrok közt kifeszített húroknak felel meg, ugyanúgy, mint a pókháló szálai.

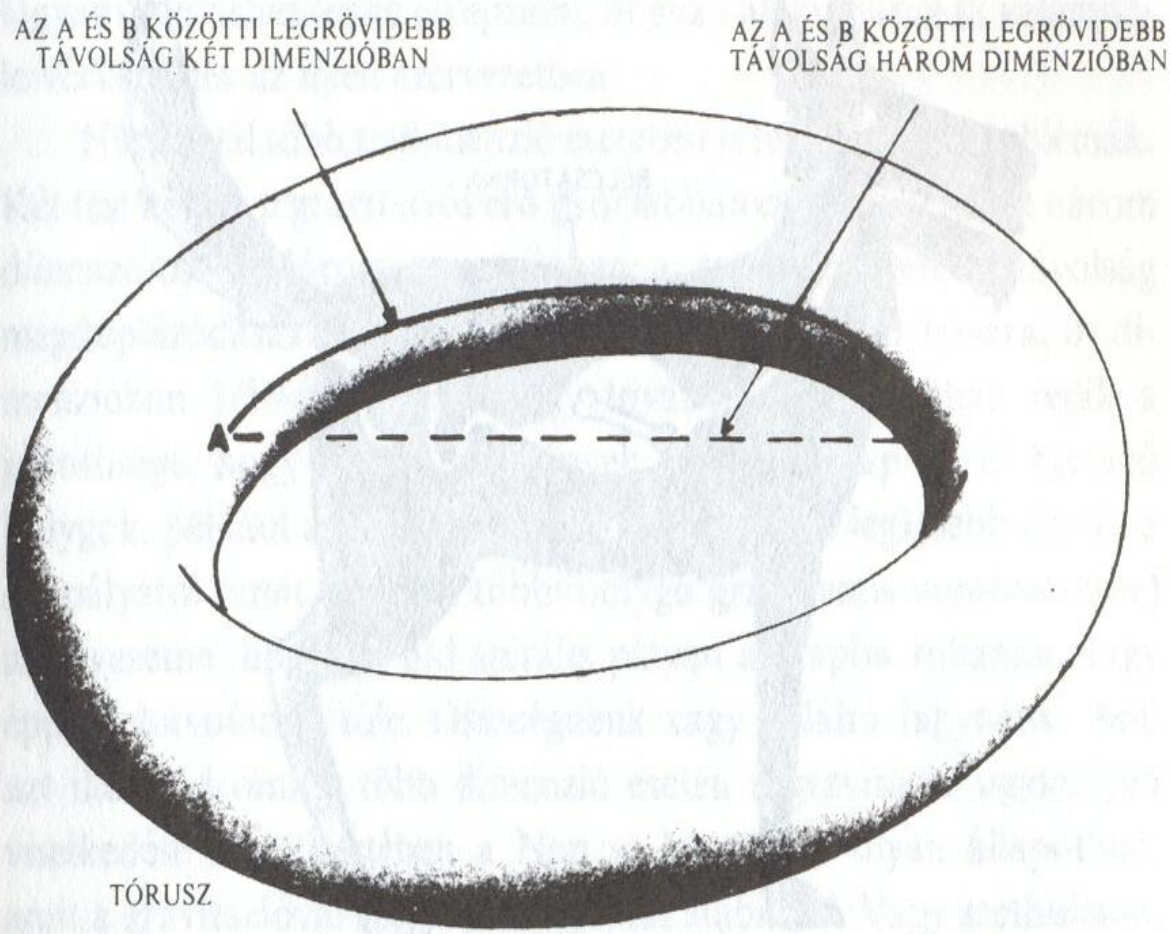
Ahhoz, hogy ez az elmélet a részecskék közt ható erős kölcsönhatás megfigyelt értékével azonos erősséget adjon, a húrokat tíz tonnával feszített gumiszalagokként kellett leírni.

1974-ben a párizsi Joel Scherk és a California Institute of Technology-nál dolgozó John Schwarz cikkükben azt írták, hogy a húrelmélet alkalmas ugyan a gravitáció leírására, de csak akkor, ha a húrban ébredő feszítőerő sokkal nagyobb: mintegy ezer millió millió millió millió millió millió tonna (harminckilenc nulla az egyes után). Szokványos távolságléptékek esetén a húrelmélet jóslatai ugyanolyanok lennének, mint az általános relativitáselmélet jóslatai, kis léptékek esetén azonban megváltoznának; e jelenség a centiméter ezer millió millió millió millió milliomod részénél (a

centiméter osztójában az 1 után harminchárom nulla áll) lép fel. Schwarz és Scherk munkája nem keltett különösebb figyelmet; a szakemberek éppen akkoriban vetették el az erős köicsönhatáson alapuló, eredeti húrelméletet a kvarkokon és gluonokon alapuló teória kedvéért, mivel ez a jelek szerint sokkal jobban egyezett a tapasztalatokkal. Scherk tragikus körülmények között hunyt el (cukorbeteg volt és kómába esett, amikor senki se volt a közelében, hogy inzulininjekciót adjon neki). Schwarz tehát maga maradt a porondon, mint a húrelmélet lényegében egyedüli támogatója, de olyan variánsé, amelyben alaposan megnőtt a húr feszültsége.

1984-ben hirtelen két okból is feltámadt az érdeklődés a húrelmélet iránt. Egyrészt azért, mert nem túl sok haladás mutatkozott a szupergravitáció véges voltának igazolása irányában, és az se látszott, hogyan magyarázza meg ez az elmélet a megfigyelhető részecskék létét. Másrészt pedig azért, mert John Schwarz és a londoni Queen Mary College kutatója, Mike Green megmutatták, hogy a húrelmélet megmagyarázhatja a megfigyeltekhez hasonló, eredendően "balkezes" részecskék létezését. Akárhogy is, hirtelen rengetegen láttak munkához a húrelmélet terén. Ki is dolgozták az újabb változatot, a heterotikus húrelméletet, ami a jelek szerint akár meg is magyarázhatná a megfigyelhető részecskék típusait. A húrelméletek is végtelen mennyiségekre vezetnek, azonban úgy véljük, a heterotikus húrokhoz hasonló változatokban ezek kioltják egymást (bár nem tudjuk biztosan, hogy valóban megteszik-e).

A húrelméletek azonban ennél nagyobb problémát is felvetnek: úgy tűnik, csak akkor ellentmondásmentesek, ha a téridőnek a szokványos négy helyett tíz vagy huszonhat dimenziója van! A téridő rendkívüli dimenziói a sci-fi birodalmában persze közhelynek számítanak, sőt egyenesen nélkülözhetetlenek, hiszen enélkül a relativitáselmélet ismert feltétele - semmi se lehet gyorsabb a fénynél - következtében túl soká tartana a csillagközi és intergalaktikus utazás.



10.7 ÁBRA

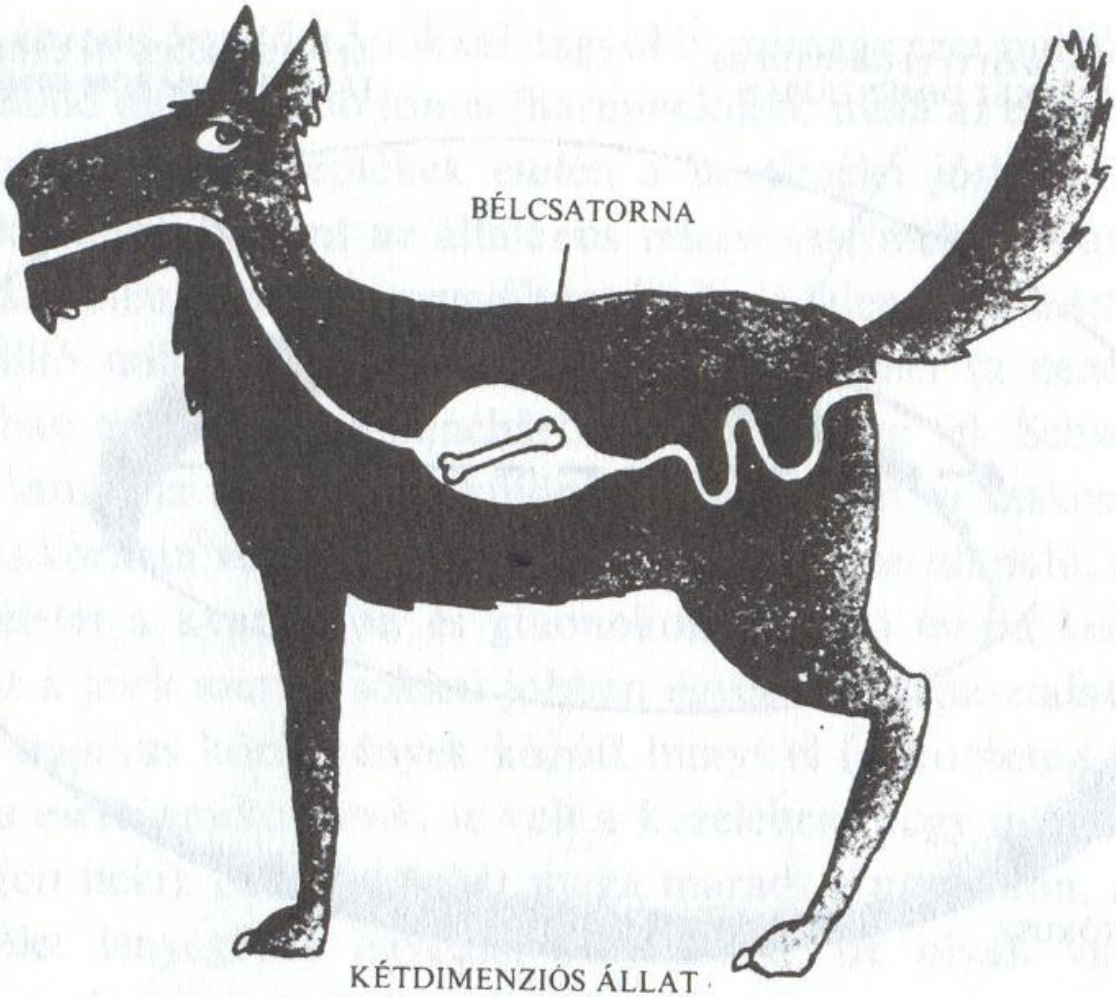
A tudományos-fantasztikus elképzelés szerint magasabb dimenziókban mozogva levághatjuk a kanyart. Ez egyszerűen szemléltethető. Tegyük fel, hogy a tér, amelyben élünk, mindössze két dimenzióval rendelkezik, és felülete úgy görbül, mint a mentőöv avagy tórusz (10.7. ábra). Ha a gyűrű belső oldalán tartózkodunk valamely pontban, s egy szem benső belső pontra akarunk eljutni, végig kell mennünk a gyűrű belső oldalán. Ha viszont három dimenzióban mozoghatnánk, egyszerűen átvághatnánk egyik pontból a másikba.

Vajon miért nem vesszük észre a körülöttünk tobzódó dimenziókat - már ha tényleg körülöttünk vannak? Miért csak a három tér és egy idődimenziót érzékeljük? Az elmélet erre azt a választ sugallja, hogy a többi dimenzió icipici térben gyűrődik össze, méretük millió millió millió millió milliószor kisebb egy centiméternél.

Ez olyan kicsi, hogy egyszerűen nem vesszük észre, csupán az egy idő- és három térdimenzióról veszünk tudomást, azokról, amelyekben a téridő egészen lapos. Olyan ez, mint a narancs héja: ha közelről szemügyre vesszük, tele van görbülettel és ránccal, de kellő távolságból szemlélve eltűnnek a kráterek, a felszín simának látszik. Hasonló a téridő esete is: kisléptékű skálán tízdimenziós és erősen görbült, nagyobb lépték esetében azonban nem látjuk meg az extra dimenziók görbületét. Ha ez a kép helytálló, akkor jaj a leendő hosszú járatú űrhajósoknak: az extra dimenziók mérete túl kicsi, nem fér át rajtuk az űrhajó. Sőt még egy nagy jelentőségű probléma vetődik föl. Hogy lehet, hogy csak néhány, és nem az összes dimenzió gyűrődik össze pirinyó

gombóccá? Föltehető, hogy a legkorábbi világegyetemben az összes dimenzió erősen görbült volt. Miért simult ki egy idő- és három térdimenzió, mialatt a többiek szorosan összegöngyöltek maradtak?

Az antropikus elv kínálja az egyik lehetséges magyarázatot. Két térdimenzió nem tűnik elegendőnek a magunkfajta bonyolult lények kifejlődéséhez. Például az egydimenziós földön élő kétdimenziós állatok csak egymáson átmászva haladhatnának tovább. Ha a kétdimenziós állat megenne valamit, amit nem bír teljesen megemészteni, ugyanott kellene kiadnia a maradékot, ahol az ételt lenyelte, hiszen ha testén átjáró vezetne keresztül, az mindjárt ketté is vágná az állatot: kétdimenziós lényünk szépen kétfelé esne (10.8. ábra).



10.8 ÁBRA

Ugyanilyen nehéz lenne elképzelni, hogyan alakulhatna ki valamiféle vérkeringés az ilyen szervezetben.

Háromnál több térdimenzió esetében is felvetődnek problémák. Két test között a gravitációs erő gyorsabban csökkenne, mint három dimenzióban. (Három dimenzióban a gravitációs erő a távolság megduplázódásakor 1/4-ére esik. Négy dimenzióban 1/8-ára, öt dimenzióban 1/l6-ára esne, és így tovább.) Ennek abban rejlik a jelentősége, hogy ilyen körülmények között a Nap körül keringő bolygók, például a Föld pályája instabil lenne: a legkisebb eltérés a körpályától (amit például a többi bolygó gravitációs vonzása okoz) arra vezetne, hogy a Föld spirális pályán a Napba zuhanna, vagy éppen eltávolodna tőle. Összeégnénk vagy halálra fagynánk. Ami azt illeti, háromnál több

dimenzió esetén a gravitáció ugyanilyen viselkedése következtében a Nap se létezhetne olyan állapotban, amit a gravitációval szemben a nyomás stabilizál. Vagy széthullana, vagy fekete lyukká roppan na össze. Egyik esetben sem szolgálhatna fény- és hőforrásként a Föld számára. Áttérve a kisebb léptékekre: az elektronokat az atommag körüli pályára kényszerítő elektromos erő is a gravitációs erőhöz hasonlóan viselkedne. Az elektron tehát vagy elszökne az atomból, vagy spirális pályán a magba zuhanna. Egyik esetben se léteznének a mai értelemben vett atomok.

Egyértelműnek látszik, hogy az élet - legalábbis az általunk megismert formákban - csak a téridő olyan tartományaiban létezhet, amelyekben egy idő- és három térdimenzió nem görbül össze icipici méretűre. A gyenge antropikus elvhez folyamodhatunk tehát, feltéve, hogy megmutatjuk: a húrelmélet legalábbis megengedi, hogy legyenek ilyen tartományok a világegyetemben - és a húrelmélet ezt csakugyan megengedi. Az sincs kizárva, hogy a világegyetemnek más tartományai, sőt más világegyetemek is léteznek (akármit jelentsen is ez), és ezekben az összes dimenzió picire göndörödött, vagy éppen négynél több dimenzió simult ki többé-kevésbé; az ilyen tartományokban azonban nem létezhetnek értelmes lények, akik megfigyelhetnék a tényleg érvényesülő dimenziók eltérő számát.

A húrelméletnek a téridőben esetleg létező dimenziók számán túlmenőleg is több kérdésre kell válaszolnia, mielőtt kikiálthatnánk a fizika legvégső, egyesített elméletévé. Nem tudjuk, tényleg kiegyenlíti-e egymást az összes végtelen mennyiség, vagy hogy pontosan miként kapcsoljuk össze a húron végigfutó hullámot az éppen megfigyelt részecsketípussal. Mégis valószínű, hogy ezeket a kérdéseket az elkövetkező néhány év során tisztázzuk, és a század végére eldől, hogy tényleg a húrelmélet-e a fizika oly régóta keresett egyesített elmélete. De létezhet-e csakugyan ez az egyesített elmélet? Nem kergetünk-e délibábot? Három lehetőséget vethetünk fel:

1) Valóban létezik teljes, egyesített elmélet, és ha elég ügyesek vagyunk egy szép napon meg is találjuk.

2) A világegyetemnek nincs végső elmélete, csupán a viszonyokat mind pontosabban és pontosabban leíró elméletek végtelen sorozata létezik.

3) A világegyetemnek nincs elmélete; az események egy bizonyos mértéken túl nem jósolhatók meg, hanem véletlenszerűen, önkényesen következnek be.

Többen a harmadik lehetőség mellett érvelnének, mivel a törvények teljes körű rendszere - ha létezik - csorbítaná Isten szabadságát, hogy meggondolja magát és közbeavatkozzék. Olyan ez, mint a réges-régi paradoxon: teremthet-e Isten akkora követ, amekkorát ő maga se tud fölemelni? Az a feltevés azonban, hogy Isten esetleg megváltoztatná akaratát, tipikus példája annak a tévedésnek, amelyre már Szent Ágoston rámutatott: Istent nem képzelhetjük el az időben létező lényként, mivel az idő csupán az Isten által teremtett világegyetem egyik sajátsága. Ő pedig bizonyára tudta, mit akar!

A kvantummechanika beköszöntésekor fel kellett ismernünk, hogy az eseményeket nem jósolhatjuk meg teljes pontossággal, mindig marad némi bizonytalanság. E véletlenszerűséget Isten közbeavatkozásának is tulajdoníthatjuk, ha tetszik; ez azonban fölöttébb bizarr közbeavatkozás lenne: semmi sem bizonyítja, hogy valamilyen cél felé irányulna. Sőt: ha volna célja, definíciója szerint már nem lehetne véletlenszerű. Legújabban már a tudomány céljának átfogalmazásával hatékonyan felszámoltuk a harmadik lehetőséget: olyan törvények rendszerét kívánjuk megfogalmazni, amelyek a határozatlansági elv megszabta határok közötti pontossággal teszik lehetővé az események előrejelzését.

A második lehetőség szerint egyre kifinomultabb elméletek végtelen sorozatával állunk szemben. Minden eddigi tapasztalatunk ezt a feltevést igazolja. Számtalanszor növeltük méréseink érzékenységét vagy végeztünk új típusú megfigyeléseket, s eredményeink olyan jelenségekre világítottak rá, amelyeket a létező elméletek nem láttak előre. Értelmezésükhöz tehát haladottabb elméletet kellett kidolgoznunk. Nem lenne hát túl meglepő, ha a nagy egyesített elméletek (GUT) jelenlegi nemzedéke tévesen jelentené ki, hogy az elektrogyenge egyesítési energia (kb. 100 GeV)

és a nagy egyesítési energia (ezer millió millió GeV) közötti tartományban semmi érdemben új jelenségre se kell számítani. Minden további nélkül elképzelhető, hogy az anyag szerkezetének néhány olyan új rétegére bukkanunk, amelyek alapvetőbbek a ma "eleminek" tekintett elektronoknál és kvarkoknál.

A gravitáció azonban, úgy tűnik, határt szab az "egymásba skatulyázott skatulyák" sorozatának. Ha egy részecske elérné a Planck-energiának nevezett szintet, tíz millió millió millió GeV-ot (tizenkilenc nulla az 1 után), akkor tömege olyan koncentrált lenne, hogy a világegyetem többi részétől elszakadva picike fekete lyukat alkotna. Várható tehát, hogy az egyre kifinomultabb elméletek sorozata a növekvő energiák felé haladva elér valamiféle határt, s így az is várható, hogy létezik a világegyetem végső elmélete. A Planck-energiát persze nagyon nagy távolság választja el a körülbelül 100 GeV-tól, ami a jelenleg laboratóriumban előállítható maximális érték. A belátható jövőben nem lesz olyan részecskegyorsítónk, ami áthidalhatná ezt a szakadékot ! A világegyetem legkorábbi időszaka során azonban ezeknek az energiáknak is szerephez kellett jutniuk.

Úgy hiszem, komoly esélyünk van rá, hogy a korai világegyetem tanulmányozása és a matematikai ellentmondásmentesség követelményei még néhányunk életében elvezetnek bennünket a teljes egyesített elmélethez - feltéve természetesen, hogy nem robbantjuk fel magunkat korábban.

Mit jelentene, ha tényleg felfedeznénk a világegyetem végső elméletét? Az 1. fejezet magyarázatai szerint sosem lehetünk biztosak benne, hogy valóban megtaláltuk a helyes elméletet, mivel az elméleteket nem lehet bebizonyítani. Ha azonban az elmélet matematikailag ellentmondásmentes és előrejelzései mindig megfelelnek a tapasztalatoknak, ésszerű bíznunk benne, hogy az igazit találtuk meg. Ez az emberi intellektus történetének hosszú, dicsőséges fejezetét zárná le - azt, amely a világegyetem megértéséért vívott harcot taglalja. Ugyanakkor forradalmasítaná a hétköznapi ember elképzelését a világegyetemet kormányzó törvényekről. Newton idejében egy iskolázott személy számára elképzelhető volt, hogy legalább körvonalaiban áttekintést szerezzen az emberi tudás egészéről.

A tudomány fejlődének sebessége ezt azóta lehetetlenné tette. Az új megfigyelések értelmezése érdekében állandóan változnak az elméletek, így soha sincsenek annyira feldolgozott, egyszerűsített formában, hogy a laikus is megérthesse őket. Az embernek specialistává kell válnia, s még ekkor is csak a tudományos elméletek kis részének alapos elsajátításában reménykedhet. Nem is beszélve arról, hogy a fejlődés hallatlanul gyors tempója következtében kisebb-nagyobb mértékben máris elavult mindaz, amit az iskolában vagy az egyetemen oktatnak. Alig néhányan képesek lépést tartani a tudomány fürgén előretörő frontvonalával, s ők is minden pillanatukat erre áldozzák, s csupán szűk tartományban mélyednek el. A többieknek vajmi kevés fogalmuk lehet az elért haladásról és az általa okozott izgalomról. Ha hihetünk Eddingtonnak, akkor hetven évvel ezelőtt mindössze ketten értették az általános relativitáselméletet. Manapság több tízezer végzős egyetemista érti, és milliókra rúg azoknak a száma, akiknek legalább fogalmuk van a dologról.

A teljes egyesített elmélet felfedezése esetén viszont csupán idő kérdése lenne, mikor dolgozzák fel és egyszerűsítik az elméletet ugyanilyen módon, hogy az iskolákban legalább körvonalaiban tanítható legyen. Akkor pedig mindannyian képet alkothatunk a világegyetemet kormányzó, létünkért felelős törvényekről.

Az eseményeket általában akkor sem jósolhatjuk meg, ha fel is fedezzük a teljes egyesített elméletet. Ennek két oka van. Az egyik a kvantummechanika határozatlansági elve által az előrejelzéseink pontossága elé állított korlát. Ezt semmiképpen sem kerülhetjük meg. A gyakorlatban azonban ez a korlátozás kevésbé szigorú, mint a második. Ez abból fakad, hogy a legegyszerűbb esetek kivételével nem tudjuk pontosan megoldani elméletünk egyenleteit. (Arra sem vagyunk képesek, hogy megadjuk három test mozgását a newtoni gravitációs elmélet szerint. A nehézség a testek számával és az elmélet bonyolultságával arányosan nő.) A legszélsőségesebb körülményeket kivéve, tudjuk, milyen törvények kormányozzák az anyag viselkedését. Ismerjük például a kémia és biológia alapjául szolgáló törvényeket. Mégis nyilvánvaló, hogy egyik tudományágat se soroltuk a megoldott problémák birodalmába; mindeddig nemigen tudtuk

matematikai formulák segítségével megjósolni az emberi viselkedést! Ha tehát meg is találjuk az alapvető törvények teljes készletét, akkor is előttünk áll még az intellektuális kihívás mind jobb és jobb közelítő módszerek kifejlesztésére, hogy használható jóslatokat tehessünk bonyolult, életszerű szituációk kimenetelére. A teljes, ellentmondásmentes egyesített elmélet kidolgozása csak az első lépés: célunk a körülöttünk zajló események és saját létezésünk tökéletes megértése.

11

ÖSSZEGZÉS

Zavarba ejt bennünket a való világ. Érteni szeretnénk a magunk körül látottakat, ezért feltesszük a kérdést: milyen a világegyetem természete? Hol van benne a mi helyünk, honnan jött, és hová tart a világegyetem? Miért olyan, amilyen? Hogy válaszolhassunk ezekre a kérdésekre, magunkévá teszünk valamilyen "világképet". Ilyen világkép a lapos Földet hordozó teknősbékák végtelen tornya, és ugyanilyen a szuperhúrelmélet is.

Mindkettő a világegyetem elmélete, bár az utóbbi sokkal matematikusabb és precízebb, mint az előbbi. Mindkét elmélet nélkülözi a megfigyelésen alapuló bizonyítékokat: senki se látta még a Földet hordozó óriási teknősbékát, node szuperhúrt se látott még senki. A teknősbéka-elmélet azonban hibás tudományos elmélet, mivel azt jósolja, hogy leeshetünk a világ pereméről. Ezt mindeddig semmilyen tapasztalat sem igazolta, hacsak nem a teknősbékák révén magyarázhatjuk meg, miért tűnnek el állítólag az emberek a Bermuda-háromszögben.

A világegyetem leírására és értelmezésére tett legkorábbi elméleti erőfeszítések azon az elképzelésen alapultak, hogy az eseményeket és természeti jelenségeket emberi érzelmekkel felruházott szellemek ellenőrzik, akik fölöttébb emberi és megjósolhatatlan módon cselekszenek. A szellemek természeti objektumokat népesítenek be, így a folyókat és hegyeket, valamint égitesteket is, köztük a Napot és a Holdat. Szívességeket lehetett kérni tőlük, a talaj termékenységének, az évszakok folytonos váltakozásának biztosításához pedig meg kellett nyerni jóindulatukat. A régieknek azonban fokozatosan fel kellett figyelniük bizonyos szabályszerűségekre: a Nap mindig keleten kelt és nyugaton nyugodott, akár áldoztak a Napistennek, akár nem. A Nap, a Hold és a bolygók pedig precíz pályákat követtek az égen, s ezeket figyelemre méltó pontossággal meg is lehetett jósolni előre. Lehetett ugyan istenség a Nap vagy a Hold, de csak olyan isten, aki szigorú törvényeknek engedelmeskedik, mégpedig kivétel nélkül minden esetben - ha eltekintünk az olyan történetektől, mint amilyenben Józsué megállította a Napot.

Ezek a szabályszerűségek és törvények kezdetben csak a csillagászat és néhány rokon terület esetében voltak nyilvánvalóak. A civilizáció fejlődése során, mindenekelőtt az elmúlt 300 évben mind több szabályt és törvényt fedeztek fel. E törvények sikere vezette Laplace-t a múlt század elején a tudományos determinizmus megfogalmazására: föltételezése szerint léteznie kell olyan törvények együttesének, amelyek előre megszabják a világegyetem további fejlődésének menetét, ha állapota valamely időpontban ismert. Laplace determinizmusa két szempontból sem volt teljes értékű. Nem mondta meg, hogyan kell a törvényeket megválasztani, és nem határozta meg a világegyetem kiindulási állapotát. Ezeket Istenre hagyta. Isten dönti el, milyen állapotból indul, s milyen törvényeknek engedelmeskedjék a világegyetem fejlődése, a továbbiakban azonban nem avatkozik bele a dolgok menetébe. Isten szerepe tehát lényegileg azokra a területekre korlátozódott, amelyeket a tizenkilencedik századi tudomány nem értett.

Ma már tudjuk, hogy Laplace-nak a determinizmusba vetett reményei nem válhattak valóra, legalábbis az ő elgondolásai szerint nem. A kvantummechanika határozatlansági elve értelmében bizonyos mennyiségek párjai, például egy részecske sebessége és helyzete, egyszerre, teljes pontossággal nem jósolhatók meg.

A kvantummechanika az ilyen helyzeteket a kvantumelméletek osztályának segítségével kezeli, amelyekben a részecskéknek nincs jól definiált sebességük és pozíciójuk, hanem egy hullám jelképezi őket. E kvantumelméletek determinisztikusak, amennyiben megadják a hullám időbeli fejlődésének törvényszerűségeit. Ha tehát ismerjük a hullámot valamely időpontban,

kiszámíthatjuk, milyen lesz valamely más időpontban. A megjósolhatatlan, véletlenszerű elem csak akkor jelenik meg, amikor a hullámot részecskesebességekként és részecskepozíciókként szeretnénk értelmezni. Az is lehetséges, hogy ez a mi hibánk: hátha nincsenek is részecskehelyzetek és -sebességek, csak hullámok. Mi pedig igyekszünk ráerőltetni a hullámokat a sebességekkel és pozíciókkal kapcsolatos előítéleteinkre. Ebből persze hibás illeszkedés származik, s ez az oka a látszólagos megjósolhatatlanságnak.

Gyakorlatilag újradefiniáltuk a tudomány feladatát: olyan törvények feltárását várjuk tőle, amelyek a határozatlansági elv korlátai között teszik lehetővé, hogy megjósoljuk az események kimenetelét. Mindazonáltal megválaszolatlan marad a kérdés: miért és hogyan választották meg a világegyetem törvényeit és kezdeti állapotát?

Különleges szerepet szántam ebben a könyvben a gravitációt kormányzó törvényeknek, mivel a gravitáció alakítja ki a világegyetem nagyléptékű szerkezetét, még ha ez is a leggyengébb az erők négy fajtája közül. A gravitáció törvényei nem fértek össze azzal az egészen a legutóbbi időkig általános nézettel, hogy a világegyetem az időben változatlan; mivel a gravitáció mindig vonzás, a világegyetemnek vagy tágulnia, vagy zsugorodnia kell. Az általános relativitáselmélet szerint a múltban végtelen sűrűségű állapotnak kellett fennállnia, az ezt megváltoztató Nagy Bumm volt az idő tényleges kezdőpillanata. Ha a világegyetem újra összeroppan, újabb végtelen sűrűségű állapot fog kialakulni, a Nagy Zutty; ez az idő végét jelenti majd. Ha nem is omlik össze az egész világegyetem, akkor is kialakulnak szingularitások azokban a korlátozott terjedelmű tartományokban, amelyek összeroppannak és fekete lyukakat hoznak létre. Ezek a szingularitások az idő végét jelentik minden és mindenki számára, ami és aki belehullik a fekete lyukba. A törvények a Nagy Bummnál és más szingularitásoknál is érvényüket vesztik, Istennek tehát csorbítatlan marad a szabadsága, hogy tetszése szerint szabja meg a történendőket és a világegyetem kezdetét.

Új, eddig sosem látott lehetőségek tárulnak fel előttünk, mikor a kvantummechanikát az általános relativitáselmélettel kombináljuk: a tér és idő együttese véges, négydimenziós, szingularitások és határok nélküli teret alkot, olyat, mint a Föld felszíne, csak több dimenzióval. A jelek szerint ez az elképzelés sokat megmagyaráz a világegyetem megfigyelt sajátságai közül, például a nagyléptékű homogenitást, s ezzel együtt a kisebb léptékű inhomogenitást, a galaxisokat, csillagokat, sőt emberi lényeket is. Az idő általunk észlelt irányára is magyarázatot ad. Ha azonban a világegyetem teljesen magába zárt, se szingularitásai, se határai nincsenek, és tökéletesen leírható egy egyesített elmélettel, akkor komoly veszély fenyegeti a Teremtő Isten szerepét.

Einstein egyszer feltette a kérdést: "Mekkora választási lehetősége volt Istennek a világegyetem megteremtésekor?" Ha a határtalanság feltétele igaz, akkor semmi szabadsága sem volt a kezdeti feltételek megválasztásában. Természetesen nyitva állt előtte a világegyetemet irányító törvények megválasztása. Egyáltalán nem biztos viszont, hogy ez olyan sokat jelenthetett: nagyon könnyen elképzelhető, hogy csupán egy vagy néhány teljes körű, egyesített elmélet létezik, mint pl. a heterotikus húrelmélet, amely ellentmondásmentes és megengedi olyan bonyolult szerkezetek kialakulását, mint az emberi lények, akik képesek a világegyetem törvényeinek felkutatására és Isten természete felől érdeklődnek.

Ha csak egy lehetséges egyesített elmélet létezik, az sem más, mint egy csomó egyenlet és szabály. Mi lehel életet az egyenletekbe, mi teremt számukra világegyetemet, amit leírhatnak ? A tudomány szokásos módszere, a matematikai modell felállítása nem válaszolhat arra a kérdésre, hogy miért áll a modell rendelkezésére a modellezésre váró világegyetem. Miért vállalja a világegyetem a létezéssel járó összes kényelmetlenséget? Olyannyira kötelező az egyesített elmélet, hogy saját létezését is kivívja? Vagy teremtőre van szükség, s ha igen, van-e a teremtőnek ezen túlmenő befolyása a világegyetemre? És ki teremtette a teremtőt?

A legutóbbi időkig a tudósokat túlságosan elfoglalta azoknak az új elméleteknek a megalkotása, amelyek leírják, milyen a világegyetem, s nem értek rá megkérdezni, miért olyan. Azok az emberek viszont, akik tisztjüknél fogva a miértek megkérdezésére vállalkoztak - a filozófusok -, képtelenek

voltak lépést tartani a tudományos elméletek fejlődésével. A tizennyolcadik században a filozófusok az emberi tudás egészét, benne a természettudományt is, saját területüknek tekintették, és azt a kérdést is feltették: "Volt-e kezdete a világegyetemnek?" A tizenkilencedik és a huszadik század folyamán azonban a tudomány műszakivá és matematikussá vált a filozófusok, illetve - néhány szakértőtől eltekintve - mindenki más számára.

A filozófusok oly mértékben csökkentették vizsgálódásuk területét, hogy Wittgenstein, századunk leghíresebb filozófusa kijelentette: "Nem marad más feladat a filozófia számára, mint a nyelvek elemzése". Micsoda bukás az Arisztotelésztől Kantig terjedő nagyszerű filozófiai tradícióhoz képest!

Ha végül is sikerül megtalálnunk a teljes, egyesített elméletet, idővel legalább a legfontosabb elveket érthetővé kell tennünk mindenki számára, hogy az elmélet ne maradhasson néhány specialista magánügye. Akkor pedig mi mindannyian, tudósok, filozófusok, hétköznapi emberek együtt boncolgathatjuk: miért létezünk, mi és a világegyetem. Az emberi értelem leghatalmasabb diadala lesz, ha erre a kérdésre választ találunk - mert akkor megismerjük Isten gondolatait.

ALBERT EINSTEIN

Közismert Einstein politikai kapcsolódása az atombombához: aláírta a Franklin Roosevelt elnökhöz írott levelet, amely végül meggyőzte az Egyesült Államok vezetőit, hogy komolyan kell foglalkozniuk a kérdéssel. A világháborút követően személyesen is részt vett a nukleáris konfliktus megelőzésére irányuló erőfeszítésekben. Szó sincs arról, hogy mindez csupán a politika világába belerángatott tudós elszigetelt akciója lett volna. Einstein élete, ahogy ö maga mondta, "megoszlott a politika és az egyenletek között".

Első politikai kezdeményezéseire az 1. világháború alatt került sor, amikor professzorként Berlinben dolgozott. A háborút az emberi életek oktalan pusztításának látta. Hamar torkig lett vele, és háborúellenes megmozdulásokhoz csatlakozott. A polgári engedetlenséget pártolta, és nyilvánosan bátorította a sorozást megtagadókat. Mindez nemigen növelte népszerűségét kollégái körében.

A háború után a megbékélés és a nemzetközi kapcsolatok javítása érdekében fejtette ki erőfeszítéseit. Ez sem szaporította barátai számát, s politikája hamarosan még azt is megnehezítette számára, hogy akárcsak előadások tartása végett az Egyesült Államokba utazzék.

Einstein másik nagy célja a cionizmus (zsidó mozgalom, melynek célja a szétszóródott zsidóság egységes nemzetként való letelepítése ősei hazájában, a Szentföldön) volt. Zsidó származása ellenére Einstein elutasította Isten bibliai fogalmát. Az 1. világháború előtt és alatt egyre növekvő antiszemitizmus hatására azonban mindinkább azonosságot vállalt a zsidó közösséggel, később pedig a cionizmus bátor támogatójává vált. A népszerűtlenség ezúttal sem gátolta véleménye kifejtésében. Egyre erősebb támadások érték elméleteit, még egy anti-Einstein társaság is megalakult. Valakit el is ítéltek, amiért Einstein meggyilkolására bújtott másokat (kerek hat dollár bírsággal sújtották). Einsteint mindez hidegen hagyta. Amikor megjelent a 100 szerző Einstein ellen című könyv, mindössze ennyit mondott: "Ha tévedtem volna, egy is elég lenne." 1933-ban, Hitler hatalomra kerülésekor Einstein Amerikában tartózkodott. Bejelentette, hogy sohasem tér vissza Németországba.

Mialatt a náci rendőrség feldúlta a házát és elkobozta bankbetétjét, egy berlini újság a következő szalagcímmel jelent meg: "Jó hír Einsteinről: Nem jön vissza!". A náci fenyegetéssel szembenézve Einstein feladta pacifizmusát, sőt: attól tartva, hogy a német tudósok megépítik az atombombát, azt javasolta, hogy az Egyesült Államok is fejlessze ki a sajátját. Még fel sem robbantották azonban az első atombombát, amikor Einstein már nyilvánosan figyelmeztetett a nukleáris háború veszélyeire, és a nukleáris arzenál nemzetközi ellenőrzését szorgalmazta.

Einstein élete során béketeremtési erőfeszítései kevés tartós eredményt hoztak - és még kevesebb barátot szerzett velük magának. A cionizmust támogató szavai azonban illő elismerésben

részesültek: 1952-ben felajánlották számára Izrael Állam elnöki tisztét.

Einstein visszautasította az ajánlatot, mondván, hogy túl naivnak tartja magát a politizáláshoz. Lehet, hogy nem ez volt az igazi ok.

Ahogy ő maga mondta: "Az egyenletek fontosabbak számomra, mivel a politika a jelennek szól, az egyenlet azonban az örökkévalóság darabkája."

GALILEO GALILEI

Talán egyetlen személyiség sem tett többet a modern tudomány megszületéséért, mint Galilei. Központi szerepet kapott filozófiájában híres konfliktusa a katolikus egyházzal, mivel Galilei az elsők között érvelt amellett, hogy az embernek igenis van esélye a világ működésének megértésére, s hogy ezt a való világ megfigyelésével érheti el.

Galilei hamar a kopernikuszi elmélet hívévé szegődött (amely szerint a bolygók a Nap körül keringenek), de csak akkor kezdte nyilvánosan is támogatni, amikor az elképzelés alátámasztására alkalmas bizonyítékokat talált. Olaszul (és nem a szokásos akadémikus latinsággal) írt Kopernikusz elméleteiről, és nézetei elterjedtek az egyetemeken kívül is. Ez irritálta az Arisztotelészt követő professzorokat, akik azzal a céllal fogtak össze ellene, hogy meggyőzzék a katolikus egyházat a kopernikuszi eszmék betiltásának szükségességéről.

Galileit mindez fölöttébb aggasztotta. Rómába utazott hát, hogy tárgyaljon az egyházi hatóságokkal. Érvei szerint a Biblia nem azzal a céllal íródott, hogy tudományos elméletekről tájékoztasson minket, s hogy a bevett gyakorlat szerint allegorikusnak tekintjük azokat a részleteket, amelyek ellentmondanak hétköznapi tapasztalatainknak. Az egyház azonban tartott a botránytól, amely esetleg aláaknázhatná a protestantizmussal szembeni harcát, s ezért elnyomó intézkedésekhez folyamodott. 1616-ban "hamisnak és hibásnak" nyilvánította Kopernikusz elméletét, és Galileit arra utasította, hogy többé "sohase védje vagy vallja magáénak" az elgondolást. Galilei alávetette magát a döntésnek.

1623-ban Galilei régi barátját választották pápának. Galilei késlekedés nélkül megpróbálta felülvizsgáltatni az 1616-os dekrétumot. Kudarcot vallott, de sikerült engedélyt szereznie olyan könyv írására, amely mind az arisztotelészi, mind a kopernikuszi elméletet tárgyalja. Az engedélyt két feltételhez kötötték: maga Galilei nem foglalhat állást, sőt arra a következtetésre kell jutnia, hogy az ember semmiképpen sem tárhatja fel a világ működéseinek titkait, mivel Isten ugyanazokat a hatásokat az emberi elme számára felfoghatatlan módon is előidézheti, s mivel az ember nem szabhat korlátot Isten mindenhatóságának.

A Párbeszéd a két fő világrendszerről l632-ben készült el és jelent meg. Valamennyi cenzor támogatta a kiadását - és egész Európában azonnal irodalmi és filozófiai mesterműként köszöntötték. A pápa felismerte, hogy az. emberek a könyvet a kopernikuszi világkép melletti, meggyőző érvnek tekintik, s hamar megbánta, hogy engedélyezte kiadását. Arra hivatkozott, hogy a könyv bírta ugyan a hivatalos cenzorok jóváhagyását, Galilei viszont megszegte az 1616-ban kimondott ítéletet. Galileit az inkvizíció elé állíttatta, ahol életfogytig tartó házi őrizetre ítélték, és utasították, hogy nyilvánosan ítélje el a kopernikuszi tanokat. Galilei másodízben is engedelmeskedett.

Galilei hithű katolikus maradt, de nem lehetett eltiporni a tudomány függetlenségébe vetett hitét. 1642-ben bekövetkezett halála előtt négy évvel, még mindig házi őrizetben, kicsempészték második könyvének kéziratát egy holland kiadóhoz. E munkája - a Két új tudomány - még a kopernikuszi tanok támogatásánál is inkább tekinthető a modern fizika eredetének.

ISAAC NEWTON

Isaac Newton nem volt kellemes személyiség. A többi tudóshoz fűződő kapcsolatai hírhedten rosszak voltak, élete második részét jobbára túlfűtött, indulatos vitákkal töltötte. A Principia Mathematica - kétségkívül a valaha írt legnagyobb hatású fizikai szakkönyv - publikálását követően Newton pályája meredeken emelkedett. A Királyi Társaság elnökévé nevezték ki, és ő lett minden

idők első tudósa, akit lovaggá ütöttek.

Newton csakhamar összeütközésbe került a Királyi Csillagásszal, John Flamsteaddel, aki korábban nagyfontosságú adatokkal támogatta őt a Principia megírásában, most azonban visszatartotta a Newton által igényelt információt. Newton nem törődött bele a visszautasításba: felvétette magát a Királyi Obszervatórium felügyelő bizottságába, és erőltetni próbálta az adatok azonnali közzétételét. Sikerült is Flamstead halálos ellenségével, Edmond Halley-vel elkoboztatnia és publikációra előkészíttetnie Flamstead munkáját. A Királyi Csillagász azonban bírósághoz fordult, és a legutolsó pillanatban megszerezte a lopott munka közzétételét megtiltó bírósági határozatot. A felbőszült Newton bosszúból módszeresen törölte a Principia későbbi kiadásaiból az összes hivatkozást Flamsteadra.

Sokkal súlyosabb vitába keveredett a német filozófussal, Gottfried Leibnizcel. Leibniz és Newton egymástól függetlenül dolgozták ki a matematika egyik ágát, amelyet differenciál- és integrálszámításnak nevezzük, s ami mindmáig a korszerű fizika alapjául szolgál.

Tudjuk ugyan, hogy Newton évekkel Leibniz előtt fedezte fel a differenciál- és integrálszámítást, viszont sokkal később tette közzé. Hatalmas vita tört ki az elsőbbség kérdése fölött. Mindkét fél mellett híres tudósok törtek lándzsát. Mindenesetre figyelemre méltó, hogy a Newton védelmében megjelent cikkek többségét Newton maga írta - s csupán barátai nevében publikálta! Ahogy a vita elmérgesedett, Leibniz elkövette azt a hibát, hogy a Királyi Társasághoz fordult döntésért. Elnöki tisztének megfelelően Newton maga jelölte ki a "pártatlan" vizsgálóbizottságot, és - micsoda véletlen - ide kizárólag saját barátai kerültek be! S ez még nem minden: Newton maga írta meg a bizottság jelentését, majd kiadatta a Királyi Társasággal, s ebben hivatalosan is plágiummal vádolta Leibnizet. Ezzel sem elégedett meg. Névtelen beszámolót tett közzé a jelentésről a Királyi Társaság saját folyóiratában. Leibniz halálát követően Newton többek szerint kijelentette, nagy megelégedésére szolgál, hogy sikerült "megtörnie Leibniz szívét", E két vita során Newton már nem Cambridge egyetemi életében tevékenykedett. Az antikatolikus politikában mélyedt el, majd a Királyi Pénzverde felügyelőjének zsíros állásával jutalmazták. Itt végre társadalmilag inkább elfogadható módon kamatoztathatta tehetségét az ördögi praktikákban és kegyetlenkedésben, sikeresen vitte végig hatalmas kampányát a pénzhamisítók ellen, még akasztófára is juttatott néhány embert.

KISLEXIKON

Abszolút nulla: A legalacsonyabb lehetséges hőmérséklet, amelyen az anyag nem tartalmaz hőenergiát.
Állandósult állapot: Olyan állapot, amely nem változik az időben; az állandó sebességgel pörgő gömb stacionárius, mivel bármely pillanatban ugyanúgy néz ki, noha nem statikus (nem nyugvó).
Általános relativitáselmélet: Einstein elmélete, mely azon az elven alapszik, hogy a tudomány törvényeinek minden megfigyelő számára azonosaknak kell lenniük, tekintet nélkül a megfigyelő mozgására. Az elmélet a gravitációt a négydimenziós téridő görbülete alapján magyarázza.
Antirészecske: Minden anyagi részecskének van megfelelő antirészecskéje. Amikor a részecske az antirészecskével ütközik, mindketten megsemmisülnek, csak energia marad.
Antropikus elv: Azért látjuk ilyennek a világegyetemet, mert ha másmilyen volna, nem létezhetnénk és nem is figyelhetnénk meg a világegyetemet.
Arányosság: "X arányos Y-nal" annyit tesz, hogy amennyiben Y-t egy számmal szorozzuk, akkor a hozzá tartozó X értéke is annyival szorzódik. Ha "X fordítottan arányos Y-nal", akkor amennyiben Y-t egy számmal szorozzuk, X-et ugyanazzal osztanunk kell.
Atom: A közönséges anyag alapegysége. Protonok és neutronok alkotta pici magból áll, ami körül elektronok keringenek.
Atommag: Az atom központi része; kizárólag protonokat és neutronokat tartalmaz, amiket az erős kölcsönhatás tart össze.
Chandrasekhar-határ: Egy stabil hideg csillag lehetséges tömegének felső határa, amely fölött a csillag fekete Iyukká roskad.

Elektrogyenge egyesítési energia: Az az energiaszint (kb. 100 GeV), amely fölött megszűnik az elektromágneses erő és a gyenge kölcsönhatás közötti különbség.
Elektromágneses erő: Elektromos töltéssel rendelkező részecskék között fellépő erő; a második legerősebb a négy alapvető erő között.
Elektromos töltés: A részecske ama tulajdonsága, hogy taszíthat (vagy vonzhat) más, azonosan (vagy ellentetten) töltött részecskéket.
Elektron: Az atommag körül keringő, negatív elektromos töltésű részecske.
Elemi részecske: Olyan részecskéi, amit - elvileg - nem lehet tovább osztani.
Energiamegmaradás: A természettudomány szerint energia (vagy anyagi megfelelője) nem teremtődhet és nem pusztulhat el.
Erős kölcsönhatás: A négy alapvető erő legerősebbike, s egyszersmind a legrövidebb hatótávolságú. Ez tartja össze a kvarkokat a protonok és neutronok belsejében, valamint az atomokat alkotó protonokat és neutronokat is.
Esemény: A téridő egy pontja, amit ideje és helye határoz meg.
Eseményhorizont: A fekete lyuk határa.
Fázis: Annak a mérőszáma, hogy a hullám egy bizonyos pillanatban a ciklus mely részénél tart: a hullámhegynél, a hullámvölgynél vagy valahol a kettő között.
Fehér törpe: Stabilis hideg csillag, amelyet az elektronok között a kizárási elv következtében fellépő taszítás stabilizál.
Fekete lyuk: A téridő tartománya, ahonnan az erős gravitáció következtében semmi, még a fény se szökhet meg.
Fénykúp: A téridő felülete, amely egy bizonyos eseményen áthaladó fénysugarak lehetséges irányát jelöli ki.
Fénymásodperc (fényév): A fény által egy másodperc (egy év) alatt megtett út.
Foton: A fény kvantumja.
Frekvencia: Hullám esetében a másodpercenként befejezett ciklusok száma.
Gamma-sugár: Nagyon rövid hullámhosszú elektromágneses hullámok, amelyeket radioaktív bomlás vagy elemi részecskék ütközése okoz.
Geodézikus vonal: Két pont között a legrövidebb (vagy leghosszabb) út.
Gyenge kölcsönhatás: A négy alapvető erő közül a második leggyengébb. A hatótávolsága is nagyon rövid. Az erőhordozó részecskék kivételével minden részecskére hat.
Gyorsulás: Egy tárgy sebességváltozásának sebessége.
Határozatlansági elv: Sohasem ismerhetjük pontosan egyidejűleg egy elemi részecske sebességét és helyzetét; minél pontosabban ismerjük az egyiket, annál pontatlanabbul ismerhetjük a másikat.
Határtalansági feltétel: Az az elképzelés, hogy a világegyetem véges, de (a képzetes időben) nincs határa.
Hullám/részecske kettősség: A kvantummechanika felfogása szerint nincs különbség hullámok és részecskék között: a részecskék néha hullámokként viselkednek, és megfordítva.
Hullámhossz: A hullám egymást követő hullámhegyeinek vagy hullámvölgyeinek távolsága.
Képzetes idő: Képzetes számokkal mért idő.
Kizárási elv: Két egyforma, feles spinű részecskének (a határozatlansági elv korlátain belül) nem lehet egyszerre azonos a helyzete és a sebessége.
Koordináták: Számok, amelyek egy pont helyét határozzák meg a térben és időben.
Kozmológia: A világegyetem egészének tanulmánya.
Kozmológiai állandó: Einstein által bevezetett matematikai eszköz; feladata, hogy a téridőnek "beépített" tágulási hajlamot tulajdonítson.
Kvantum: A hullámkibocsátás és -elnyelés tovább nem osztható egysége.
Kvantummechanika: Planck kvantumelméletéből és Heisenberg határozatlansági elvéből kifejlődött elmélet.
Kvark: Elemi részecske (töltött), amelyre hat az erős kölcsönhatás. A protonokat és a neutronokat három-három kvark alkotja.
Mágneses tér: A mágneses erőt létrehozó mező, amelyet az elektromos térrel együtt az

elektromágneses tér foglal magában.
Mező: Olyan valami, ami térben és időben elterülve létezik, szemben a részecskével, ami egy időben csak egy pontot foglalhat el.
Meztelen szingularitás: A téridő olyan szingularitása, amelyet nem vesz körül fekete lyuk.
Mikrohullámú háttérsugárzás: A forró, korai világegyetem ragyogásából visszamaradt sugárzás, amely már akkorra vöröseltolódást szenvedett, hogy nem is fényként, hanem mikrohullámú sugárzásként jelenik meg (néhány centiméter hullámhosszúságú rádióhullámok).
Nagy Bumm: Szingularitás a világegyetem kezdetén.
Nagy egyesítési energia: Az az energia, amely fölött feltehetőleg megkülönböztethetetlenné válik az elektromágneses erő, a gyenge és az erős kölcsönhatás.
Nagy egyesített elmélet (GUT): Az elektromágneses erőt, a gyenge és az erős kölcsönhatást egyesítő elmélet.
Nagy Zutty: Szingularitás a világegyetem végén.
Neutrinó: Rendkívül könnyű (valószínűleg tömeg nélküli) elemi anyagrészecske, amelyre csak a gyenge kölcsönhatás és a gravitáció hat.
Neutron: Töltés nélküli részecske, nagyon hasonló a protonhoz, a legtöbb atom magjában a részecskék mintegy felét alkotja.
Neutroncsillag: Hideg csillag, amit a neutronok közötti, a kizárási elven alapuló taszítás stabilizál.
Nukleáris fúzió: Az a folyamat, amelynek során két atommag összeütközik és egyetlen, nehezebb atommaggá egyesül.
Ősi fekete lyuk: A világegyetem korai fejlődése során kialakult fekete lyuk.
Planck kvantumelmélete: Az az elképzelés, hogy a fény (vagy bármilyen klasszikus hullám) csak diszkrét kvantumonként bocsátható ki vagy nyelhető el; a kvantumok energiája arányos a frekvenciával.
Pozitron: Az elektron (pozitív töltésű) antirészecskéje.
Proton: Pozitív töltésű részecske, amely a legtöbb atom magjában a részecskék mintegy felét alkotja.
Radar: Rádióhullám-impulzusokat használó berendezés, amellyel tárgyak helyzete határozható meg: ehhez megmérik, mennyi idő alatt ér oda egy impulzus és érkezik meg a visszavert jel.
Radioaktivitás: Valamely atommagtípus spontán elbomlása valamely más atommaggá.
Részecskegyorsító: Olyan berendezés, amely elektromágnesek segítségével energiát továbbít mozgó, töltéssel rendelkező részecskéknek, és így felgyorsítja őket.
Speciális relativitás: Einstein elmélete, amely azon alapszik, hogy a tudomány törvényeinek azonosaknak kell lenniük minden egyenletesen mozgó megfigyelő számára, tekintet nélkül sebességükre.
Spektrum, színkép: Egy hullám, például elektromágneses hullám felhasadása alkotó frekvenciáira.
.
Spin: Az elemi részecskék belső tulajdonsága, mely emlékeztet a hétköznapi értelemben vett perdületre, de nem azonos vele.
Súly: A gravitációs mező által a testre gyakorolt erő. Arányos a tömeggel, de nem azonos vele.
Szingularitás: A téridő pontja, ahol a téridő görbülete végtelenné válik.
Szingularitási elmélet: Az az elmélet, mely megmutatja, hogy bizonyos feltételek esetén létre kell jönnie a szingularitásnak - konkrétan, hogy a világegyetemnek szingularitással kellett kezdődnie.
Térbeli kiterjedés: Bármelyik a téridő három térjellegű dimenziója közül, azaz bármelyik, kivéve az időt.
Téridő: A négydimenziós tér, amelynek pontjai az események.
Tömeg: Egy test anyagának mennyisége; tehetetlensége, azaz gyorsulással szembeni ellenállása.
Virtuális részecske: A kvantummechanikában olyan részecske, amelyet közvetlenül nem detektálhatunk, de amelynek létezése mérhető hatásokkal jár.
Vöröseltolódás: A tőlünk távolodó csillag fényének vörösödése, amit a Doppler-effektus okoz.

A fordítás az alábbi kiadás alapján készült:
Stephen W. Hawking:

A Brief History of Time from the Big Bang to Black Holes
Bantam Books, 1988
Š 1988 by Stephen W. Hawking
Fordította: Molnár István
Előszó: Carl Sagan
Illusztrációk: Ron Miller
A fordítást szakmailag ellenőrizte:
Lux Iván
Negyedik kiadás
Fedéltipográfia: Szakálos Mihály