



STEPHEN HAWKING

LEONARD MLODINOW

AZ IDŐ MÉG RÖVIDEBB TÖRTÉNETE

AKADÉMIAI KIADÓ

Stephen Hawking
Leonard Mlodinov
AZ IDŐ MÉG RÖVIDEBB TÖRTÉNETE
([Tartalom](#))

Előszó

Ennek a könyvnek a címe csak kétszer három betűvel tér el egy először 1988-ban megjelent könyv címétől. Az idő rövid története 237 héten keresztül szerepelt a londoni Sunday Times sikerlistáján, és a Föld minden 750 lakosára jutott egy eladott példánya. Figyelemre méltó siker egy olyan könyvtől, amelyik a modern fizika legbonyolultabb kérdései közül tárgyalt néhányat. Ugyanakkor kétségtelen, hogy ezek a roppant nehéz problémák egyúttal a legizgalmasabbak is, hiszen a nagy, alapvető kérdéseket érintik: Mit tudunk valójában a Világegyetemről? Honnan tudjuk? Honnan ered a Világegyetem és mi lesz a sorsa? Ezek a kérdések alkották Az idő rövid története fő gondolatmenetét, és ezekkel foglalkozunk ebben a könyvben is. Az idő rövid története megjelenése óta eltelt évek során számtalan visszajelzést kaptunk szerte a világból a legkülönbözőbb életkorú és foglalkozású olvasóktól. Sokan és sokszor kérték, hogy készítsük el a könyv újabb változatát, amely megőrzi az eredeti mű mondanivalójának lényegét, azonban a legfontosabb fogalmakat világosabb, könnyebben emészthető formában mondja el. Esetleg voltak, akik arra számítottak, hogy egy ilyen könyvnek Az idő kevésbé rövid története lehetne a címe, azonban a visszajelzésekből nyilvánvaló volt, hogy nem sok olvasó vágyik hosszadalmas, főiskolai szintű kozmológiai* tankönyvekre. Ezért más megközelítést választottunk. Az idő még rövidebb története megírásakor megőriztük és kiterjesztettük az eredeti könyv tartalmából mindazt, ami lényeges, miközben különös gonddal figyeltünk arra, hogy a könyv viszonylag rövid és olvasmányos maradjon. Ez valóban egy rövidebb történet, mert a technikai részletekbe menő fejtegetésekből nagyon sokat elhagytunk. Úgy érezzük azonban, hogy ezért bőségesen kárpótolja az olvasót az, hogy a könyv központi kérdéseinek még inkább a mélyére hatoltunk. Egyúttal megragadtuk

az alkalmat a könyv korszerűsítésére, az új elméleti és megfigyelési eredmények beépítésére is. Az idő még rövidebb története beszámol a legújabb felfedezésekről, amelyek a fizika összes kölcsönhatását magába foglaló, egyesített elmélet keresése területén az utóbbi években születtek. Nevezetesen, foglalkozunk a húrelmélet^{*} fejlődésével, és a látszólag teljesen különböző fizikai elméletek közötti párhuzamokkal, vagy „dualitásokkal^{*}”, amelyek léte azt jelzi, hogy valóban létezik a fizika nagy, egyesített elmélete^{*}. Ami pedig a megfigyeléseket illeti, fontos, új eredményekről tudunk beszámolni, amelyek a kozmikus háttérsugárzást kutató COBE (Cosmic Background Explorer) műholdhoz és a Hubble-űrtávcsőhöz kapcsolódnak. Mintegy negyven évvel ezelőtt Richard Feynman így fogalmazott: „Szerencsések vagyunk, hogy olyan korban élhetünk, amikor még mindig történnek felfedezések. Olyan ez, mint amilyen Amerika felfedezése lehetett – az ilyesmit csak egyszer lehet felfedezni. Korunk, amelyben élünk, az a kor, amikor az emberiség előtt feltárulnak a természet legalapvetőbb törvényei.” Napjainkban minden korábbinál közelebb járunk a Világegyetem természetének megértéséhez. E könyv megírásával az volt a célunk, hogy megosszuk az olvasóval e felfedezések izalmának legalább egy részét, és a közelmúlt felfedezései nyomán a valóság legújabb képét.

ELSŐ FEJEZET

Gondolokodás a Világegyetemről

Különös és csodálatos világegyetemben élünk. Kora, mérete, viharos jelenségei és szépsége felfogásához rendkívüli képzelőerőre van szükségünk. Az ember által elfoglalt hely ehhez a hatalmas mindenséghez képest meglehetősen jelentéktelennek tűnhet. Ezért aztán megpróbáljuk felfogni az egész világot, és megérteni, miként illeszkedünk bele a nagy rendszerbe. Néhány évtizeddel ezelőtt egy híres tudós (egyések szerint talán Bertrand Russell) csillagászati előadást tartott a nagyközönségnek. Elmondta, hogyan kering a Föld a Nap körül, miközben a Nap a Tejútrendszernek nevezett, hatalmas csillagrendszer középpontja körül kering. Az előadás végén azonban a terem végében felpattant egy alacsony, idős hölgy és így szólt:

– Amit maga itt elmondott nekünk, az csupa ostobaság! A világ valójában lapos, és egy óriási teknősbéka hátán nyugszik. A tudós fölényesen elmosolyodott, mielőtt válaszolt volna:

– De vajon min áll az a teknősbéka?

– Maga nagyon agyafúrt, fiatalember, nagyon agyafúrt – vágott vissza az idős hölgy. – Hát egy másik teknősbékán, az megint egy másikon és így tovább.

Ma már a legtöbb ember nevetségesnek találná, ha valaki a világot teknősbékák végtelen tornyaként képzelné el. De miért hisszük azt, hogy ennél okosabb választ is tudunk adni? Feledkezzünk el egy pillanatra arról, mit tudunk a térről, vagy legalábbis mi az, amiről azt hisszük, hogy tudjuk. Pillantsunk fel inkább a csillagos égre. Miből áll Önök szerint az a sok apró fénypont? Talán parányi tüzek lehetnek? Nehéz elképzelni, mik azok valójában, hiszen valóságos mivoltuk messze túl esik bármiféle hétköznapi tapasztalatunkon. Ha Önök rendszeresen vizsgálgatják a csillagos eget, akkor bizonyára észrevettek már alkonyatkor a látóhatár közelében egy remegő, tűnékeny fénypontot. Ez a Merkúr bolygó, amely azonban a legcsekélyebb mértékben sem hasonlít a mi Földünkre. A Merkúron egyetlen nap kétharmad ottani évig tart. A bolygó felszíne nappal 400 Celsius-fok fölötti hőmérsékletre forrósodik fel, éjszaka viszont -200 Celsius-fok alá süllyed. De bármennyire különbözzék is a Merkúr a Földtől, még mindig könnyebb elképzelni, mint egy átlagos csillagot, amely egy olyan, hatalmas kohóhoz hasonlítható, ahol másodpercenként sok millió tonna anyag ég el, magjában pedig a hőmérséklet sok tízmillió fok.

Ugyancsak nehéz elképzelni, milyen messze is vannak valójában a bolygók és a csillagok. Az ókori kínaiak magas tornyokat építettek, hogy közelebbről lássák a csillagokat. Semmi különös nincs abban, hogy sokkal közelebbinek képzeljük a csillagokat és a bolygókat valóságos távolságuknál, hiszen a mindennapi életben semmiféle tapasztalatunk sincs az ilyen hatalmas térbeli távolságokra vonatkozóan. Ezek a távolságok olyan óriásiak, hogy értelmetlen dolog lenne szokásos távolságegységeinket használva méterekben vagy kilométerekben mérni őket. Ezért inkább a fényévet használjuk egységként, azt a távolságot, amelyet a fénysugár egy év alatt befut. A fény egyetlen másodperc alatt 300000 kilométert tesz meg,

következésképpen egy fényév roppant nagy távolság. A hozzánk legközelebbi csillag – a Napot nem számítva – a Proxima Centauri (vagy más néven Alfa Centauri C), távolsága mintegy négy fényév. Olyan messze van, hogy még a ma csak tervezőasztalon létező leggyorsabb űrhajónak is tízezer évbe telne, mire odaérne.

Az ókori ember hasztalan próbálkozott a Világegyetem megértésével, hiszen nem álltak még rendelkezésére napjaink matematikai és természettudományos ismeretei. Ma viszont nagy teljesítményű eszközök birtokában vagyunk: sokat fejlődtek matematikai és természettudományos módszereink, ugyanakkor korszerű technikai eszközöket használunk, számítógépeket és távcsöveket. Ezen eszközök segítségével a tudósok apránként egységes képpé rakosgatták össze a Világegyetemről szerzett információk sokaságát. De valójában mit is tudunk a Világegyetemről, és honnan tudjuk mindezt? Honnan származik a Világegyetem? Mi lesz a sorsa? Volt-e kezdete a világnak, és ha igen, mi volt azelőtt? Mit mondhatunk az idő természetéről? Véget ér-e valaha? Képesek lehetünk-e visszafelé haladni az időben? A fizika legújabb felfedezései, amelyek részben az új technikai eszközöknek köszönhetők, megpróbálnak választ adni ezekre az emberiséget régóta foglalkoztató kérdésekre. Egyszer majd ezek a válaszok éppoly maguktól értetődőek lesznek a számunkra, mint a Föld Nap körüli keringése – vagy esetleg éppoly nevetségesek, mint a teknősbékatorony. A választ az idő adja majd meg – bármi legyen is az.

MÁSODIK FEJEZET

Világképünk fejlődése

Bár Kolumbusz Kristóf kortársai között még sokan voltak, akik úgy gondolták, hogy a Föld lapos (sőt, ma is akadnak ilyenek), a modern csillagászat gyökerei az ókori görögökig nyúlnak vissza. Kr. e. 340 körül Arisztotelész, görög filozófus A mennyekről című művében helyesen érvel amellelt, hogy a Föld nem sík, hanem gömb alakú.

Egyik érve a holdfogyatkozások megfigyelésén alapult. Arisztotelész felismerte, hogy ezek olyankor jönnek létre, amikor a Föld a Nap és

a Hold közé kerül. Ilyenkor a Föld árnyéka éppen a Holdra esik, ez okozza a fogyatkozást. Arisztotelész megfigyelte, hogy a Föld árnyéka mindig kerek. Márpedig ha a Föld gömb alakú, akkor pontosan erre kell számítanunk, ha viszont lapos korong lenne, akkor az árnyék csak akkor lenne kerek, ha a fogyatkozás olyankor következne be, amikor a Nap pontosan a lapos korong középpontja alatt tartózkodik. Más esetekben az árnyék alakja elnyúlt lenne – vagyis kör helyett ellipszist látnánk (az ellipszis nem más, mint elnyúlt kör).

A görögök még egy, a Föld gömb alakja mellett szóló érvet ismertek. Ha a Föld lapos lenne, akkor a látóhatár felől közeledő hajók először parányi, részleteket nem mutató pontként tűnnének fel. Később, ahogy a hajó egyre közelebb érne, egyre több részletet ismernénk fel, meg tudnánk különböztetni például a vitorlákat és a hajótestet. A valóságban azonban nem ez történik. A látóhatáron feltűnő hajónak először a vitorlázatát pillantjuk meg, a hajótestet csak később vesszük észre. Az a körülmény, hogy a látóhatáron feltűnő hajónak először a magasan a hajótest fölé nyúló árbocát pillantjuk meg, egyértelműen a Föld gömb alakját bizonyítja.

A görögök megkülönböztetett figyelemmel fordultak az éjszakai égbolt felé is. Az Arisztotelész előtti évszázadokban már temérdek feljegyzés készült az égen látszó fénypontok mozgásáról. A régebbi korok csillagászaik észrevették, hogy a sok ezer apró fénypont csaknem mindegyike együtt mozog az égen, ám közülük öt (a Holdat nem számítva) a saját útját járja. Ezek időnként letérnek a szabályos kelet-nyugati útvonalról és visszakanyarodva hurkot írnak le. Ezeket a fénypontokat bolygóknak nevezték. A magyar szó a bolyongásból származik, az eredeti görög szóból viszont a számos nyelvben ma is használatos planéta megnevezés alakult ki. A görögök csak öt bolygót ismertek, mert csak ennyit lehet szabad szemmel megfigyelni: a Merkúrt, a Vénuszt, a Marsot, a Jupitert és a Szaturnuszt. Ma már persze azt is tudjuk, miért írnak le a bolygók ilyen szokatlan pályát az égen: miközben a csillagok alig mozdulnak el a Naprendszerhez képest, a bolygók a Nap körül keringenek, ennek következtében sokkal bonyolultabb pályát látszanak leírni az égen, mint a sokkal távolabbi csillagok.



Hajó a láthatáron

Mivel a Föld gömb alakú, a látóhatáron felbukkanó hajónak először csak az árbocát és a vitorlázatát látjuk, a hajótest csak később tűnik elő.

Arisztotelész úgy gondolta, hogy a Föld egy helyben áll, a Nap, a Hold, a bolygók és a csillagok pedig szabályos kör alakú pályákon egyaránt a Föld körül keringnek. Azért hitte ezt, mert valamilyen misztikus okból kifolyólag az volt az érzése, hogy a Föld a Világegyetem középpontja, a körmozgás pedig minden mozgás legtökéletesebbike. A Kr. u. II. században egy másik görög tudós, Ptolemaiosz ezt az elgondolást teljes világmodellé fejlesztette tovább. Ptolemaiosz szenvedélyesen nyilatkozott elképzeléséről. „Amidőn a csillagok egymással összefüggő sokaságának mozgását a magam örömére követem az égen”, írta, „akkor a lábam már nem is érinti a földet”.

Ptolemaiosz modellje szerint a Földet nyolc forgó szféra övezte. Minden egyes szféra valamivel nagyobb volt az előzőnél, az orosz matrjoska babához hasonlóan. A gömbök középpontjában a Föld helyezkedett el. Soha nem írta le egyértelműen, mi lehet a legkülső szférán kívül, abban azonban bizonyos volt, hogy az ott található dolgok már nem részei az ember által megfigyelhető Világegyetemnek. Eszerint tehát a legkülső gömb valamiféle határfelületet jelentett, vagy tartályt alkotott a Világegyetem számára. A csillagok állandó helyet foglaltak el ezen a legkülső szférán, hiába forgott tehát a szféra, a csillagok összetartozó

csoportként vele együtt mozogtak, következésképpen egymáshoz képest nem mozdultak el, tökéletes összhangban megfigyeléseinkkel. A belső szférák ezzel szemben a bolygókat hordozták. A bolygók azonban a csillagokkal ellentétben nincsenek hozzáerősítve saját szféráikhoz, hanem kicsiny, epiciklusoknak nevezett köröcskék mentén mozogtak saját szféráikhoz képest. A szférák a Föld körül forogtak, a bolygók viszont az epiciklusok mentén is elmozdultak, ami a Földről nézve nagyon bonyolult mozgást eredményezett. Ptolemaiosz így tudta megmagyarázni azt a megfigyelést, hogy a bolygók mozgása sokkal bonyolultabb az égboltra írt egyszerű körpályák követésénél.

Ptolemaiosz modelljének segítségével meglehetősen pontosan előre ki lehetett számítani az egyes égitestek égbolton elfoglalt helyét. A pozíciók helyes magyarázatához azonban Ptolemaiosznak azt a feltételezést is illett volna elfogadnia, hogy a Hold olyan pályán mozog, amelyen néha kétszer közelebb kerül a Földhöz, mint máskor, és ilyenkor a Holdnak kétszer akkorának kellene látszania az égen, mint egyébként! Ptolemaiosz maga is felismerte ezt a hibát, modelljét mégis meglehetősen széles körben – ha nem is fenntartások nélkül – elfogadták. Ptolemaiosz világképét a katolikus egyház a Szentírással összhangban álló tanításként kezelte, ugyanis megvolt az a kétségtelen előnye, hogy a legkülső, az állócsillagok szféráján kívül bőségesen jutott hely benne a menny és a pokol számára.

Egy lengyel pap, Nikolausz Kopernikusz azonban 1514-ben egy ettől eltérő modellt javasolt. (Eleinte csak anonim módon terjesztette nézeteit, talán attól való félelmében, hogy egyháza eretnekségért máglyahalálra ítélné.) Kopernikusz forradalmi elgondolása szerint nem kell minden égitestnek a Föld körül keringenie, hanem a Nap nyugalomban van a Naprendszer középpontjában, miközben a Föld és a bolygók kör alakú pályáikon a Nap körül keringnek. Ptolemaioszéhoz hasonlóan Kopernikusz modellje is elég jól működött, ha előrejelzései nem is tökéletesen egyeztek a megfigyelésekkel. Minthogy azonban sokkal egyszerűbb volt Ptolemaiosz modelljénél, arra lehetett számítani, hogy sikert fog aratni. De nem így történt: csaknem egy évszázadnak kellett eltelnie, mire Kopernikusz világképét kezdték komolyan venni. Akkor kezdte

két csillagász – a német Johannes Kepler és az itáliai Galileo Galilei – nyilvánosan is támogatni a kopernikuszi elméletet.



Ptolemaiosz világmodellje

Ptolemaiosz világképében a Föld a Világegyetem középpontjában áll: bolygónkat nyolc szféra veszi körül, amelyek az összes ismert égitestet hordozzák.

Galilei 1609-ben figyelte meg először egy nem sokkal korábban feltalált távcsővel az éjszakai égboltot. Amikor távcsövét a Jupiterre irányította, megállapította, hogy a bolygó körül több aprócska kísérő, vagyis hold kering. Ebből arra következtetett, hogy nem minden égitest kering közvetlenül a Föld körül, amint azt Arisztotelész és Ptolemaiosz gondolta. Eközben Kepler tökéletesítette Kopernikusz elméletét, felvetve, hogy a bolygók nem kör, hanem ellipszis alakú pályákon mozognak. Ennek az apró változtatásnak köszönhetően az elmélet előrejelzései egy csapásra összhangba kerültek a megfigyelésekkel. A két esemény a halálos ítéletet jelentette Ptolemaiosz világképe számára.

Az ellipszispályák kijavították Kopernikusz modelljét, de Kepler ezt a változatot csupán sürgősségmegoldásnak tartotta. Neki ugyanis előre kialakított elképzelései is voltak a világról, amelyek nem a megfigyeléseken alapultak. Arisztotelészhez hasonlóan ő is úgy vélte, hogy az ellipszis kevésbé tökéletes a körnél. Az elgondolás, miszerint a bolygók efféle tökéletlen pályákon mozognának, túlságosan visszataszítónak tűnt számára ahhoz, hogy azt végső igazságként elfogadhatta volna. Keplert az is zavarta, hogy az

ellipszispályák tényét nem tudta összhangba hozni azon elképzelésével, miszerint a Nap mágneses erők segítségével tartaná mozgásban a bolygókat. Bár abban nem volt igaza, hogy a mágneses erők alakítanák ki a bolygók pályáit, mégis helyesen ismerte fel, hogy valamilyen erőnek kell felelősnek lennie a mozgás létrejöttéért. A bolygók Nap körüli keringésének okát csak sokkal később, 1687-ben sikerült helyesen megmagyarázni, amikor Sir Isaac Newton kiadta *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* című munkáját. Valószínűleg ez volt legfontosabb mű a fizikai tudományok történetében.

A *Principiában* Newton kimondta azt a törvényt, amelynek értelmében minden nyugalomban lévő test mindaddig nyugalomban marad, amíg valamilyen rá ható erő állapota megváltoztatására nem készíti. Azt is leírta, miként tud az erő mozgásba hozni egy testet, vagy megváltoztatni valamely test mozgását. Akkor tehát miért is mozognak a bolygók ellipszis alakú pályákon a Nap körül? Newton szerint egy meghatározott erő a felelős ezért, nevezetesen ugyanaz az erő, amelynek hatására itt a Földön az elengedett testek nem maradnak nyugalomban, hanem inkább leesnek a földre. Ezt az erőt Newton gravitációnak, vagyis nehézkedésnek nevezte el. (Newton előtt a gravity szót csak valamilyen súlyos helyzet vagy nehézség kifejezésére használták.) Newton ezenkívül felfedezte azt a matematikai eszköztárat is, amelynek segítségével számszerűsíteni lehetett, miként reagálnak a testek valamilyen erő, például a gravitáció hatására, majd az így kapott egyenleteket meg is oldotta. Így módon be tudta bizonyítani, hogy a Nap gravitációs ereje hatására a Földnek és a többi bolygónak valóban ellipszispályán kell mozognia – pontosan úgy, amint azt Kepler kiszámította! Newton azt állította, hogy ez a törvény a Világegyetemben minden testre érvényes, a fáról leeső almától kezdve a csillagokig és a bolygókig. Ez volt az első eset a történelemben, amikor valaki ugyanazon törvények segítségével adott magyarázatot a bolygók mozgására, amelyek egyúttal a Föld mozgását is leírták. Ez a pillanat nemcsak a modern fizika, hanem a modern csillagászat kezdetét is jelentette. Ptolemaiosz szféráinak fogalmát kiiktatva immár semmi okunk sincs feltételezni, hogy a Világegyetemnek a legkülső szféra formájában bármiféle természetes határa lenne. Sőt, minthogy a csillagok

látszólag nem változtatják pozíciójukat az égen (eltekintve a Föld tengely körüli forgása tükröződéseképpen létrejövő, látszólagos körforgásuktól), magától értetődőnek látszott feltételezni, hogy a csillagok ugyanolyan égitestek, mint a Nap, csak éppen sokkal messzebb vannak. Nemcsak azt az elképzelést adtuk tehát fel, amely szerint a Föld a Világegyetem középpontja, hanem azt is, hogy Napunk, vagy talán a Naprendszerünk bármilyen szempontból is különleges lenne a Világegyetemben. Világképünknek ez a változása mélyreható átalakulást eredményezett az emberi gondolkodásban: megkezdődött a Világegyetem korszerű, természettudományos megismerésének kora.

HARMADIK FEJEZET

A tudományos elméletek természete

Ha a Világegyetem természetéről akarunk beszélni, vagy arra vagyunk kíváncsiak, volt-e a világnak kezdete, és lesz-e vége, akkor legelőször tisztában kell lennünk azzal, mi is az a tudományos elmélet. Fogadjuk el azt az erősen leegyszerűsített képet, miszerint az elmélet nem más, mint a Világegyetem egészének vagy meghatározott részének egy modellje, beleértve mindazon szabályok összességét, amelyek kapcsolatot teremtenek a modellben szereplő mennyiségek és a megfigyelések eredményei között. Az elmélet kizárólag a tudatunkban létezik, ezen kívül semmilyen valóságtartalma sincs (bármit jelentsen is ez). Az elméletet akkor tartjuk jó elméletnek, ha eleget tesz a következő két követelménynek. A legfeljebb néhány önkényes elemet tartalmazó modell segítségével pontosan le kell írnia a megfigyelések egy nagy csoportját, valamint határozott előrejelzéseket kell adnia a jövőben elvégzendő megfigyelések eredményére vonatkozóan. Arisztotelész például elfogadta Empedoklész elméletét, amely szerint minden négy őselemből épül fel, nevezetesen földből, levegőből, tűzből és vízből. Ez a kép elég egyszerűnek mondható, ám semmiféle határozott előrejelzést nem mond ki. Ezzel szemben Newton gravitációelmélete még ennél is egyszerűbb modellen alapult, miszerint a testek a tömegüknek^{*} elnevezett mennyiséggel egyenesen arányos^{*}, a közöttük lévő távolság négyzetével pedig

fordítottan arányos nagyságú erővel vonzzák egymást. Egyszerűsége ellenére az elmélet alapján rendkívül pontosan előre kiszámítható a Nap, a Hold és a bolygók égi mozgása.

Bármely fizikai elmélet mindig ideiglenes, abban az értelemben, hogy mindig csak hipotézisnek tekinthető, soha nem bizonyítható. Teljesen mindegy, hányszor végezzük el a szükséges kísérleteket, amelyek mindannyiszor alátámasztják elméletünk előrejelzéseit, soha nem lehetünk egészen bizonyosak abban, hogy az éppen soron következő kísérletnél sem fogunk az elmélet állításaival ellentétes mérési eredményt kapni. Másrészt viszont bármely elméletet nagyon könnyű megcáfolni: ehhez az elmélet előrejelzéseinek ellentmondó egyetlen megfigyelés is elegendő. Kari Popper tudományfilozófus nézete szerint a jó elmélet jellemzője az, hogy számos olyan előrejelzést ad, amelyek, legalábbis elvben, megfigyelések segítségével megcáfolhatóak. Minden egyes alkalommal, amikor azt tapasztaljuk, hogy az újabb kísérletek eredményei is egyeznek elméletünk jóslataival, akkor megnyugodhatunk, mert elméletünk ismét kiállta a megfigyeléssel történő ellenőrzés próbáját, ezért nagyobb bizalommal lehetünk elméletünk irányában. Ám ha csak egyetlen esetben is az elmélet jóslatainak ellentmondó megfigyelést teszünk, akkor elméletünket el kell vetni, vagy módosítani kell.

Legalábbis ez történik feltételezésünk szerint, de természetesen bármely alkalommal kétségbe vonhatjuk a megfigyelést végrehajtó személy kompetenciáját.

A gyakorlatban általában az történik, hogy az új elméletek a korábbiaknak valamilyen értelmű kiterjesztései, továbbfejlesztései. Így például a Merkúr bolygó mozgásának nagyon pontos megfigyelése során fény derült a bolygó megfigyelt mozgása és Newton elmélete alapján számított helyzete közötti parányi eltérésekre. Einstein általános relativitáselmélete^{*} viszont Newton elméletétől kissé eltérően írja le a bolygó mozgását. Az a körülmény, hogy Einstein elméletének előrejelzései pontosan egyeztek a megfigyelésekkel, míg Newton elmélete esetében eltérést tapasztaltak, döntő bizonyítékot jelentett az új elmélet helyessége mellett. Ennek ellenére a gyakorlati életben megoldandó feladatok legtöbbszörének a megoldásához továbbra is Newton elméletét

használjuk, mert a klasszikus elmélet és az általános relativitáselmélet előrejelzései közötti eltérés általában elhanyagolhatóan kicsiny. Newton elméletének ugyanakkor nagy előnye, hogy sokkal egyszerűbb vele a számolás, mint Einstein elmélete alapján.

A természettudomány végső célja egy olyan elmélet megalkotása, amely az egész Világegyetem minden jelenségét leírja. Mindamellett a cél elérésén fáradozó tudósok legtöbbször a feladatot két részre bontja. Először is léteznek bizonyos törvények, amelyek leírják, miként változik a Világegyetem az időben. (Ha tudjuk, milyen a Világegyetem állapota egy adott pillanatban, akkor e fizikai törvények segítségével azt is meg tudjuk határozni, milyen lesz az állapota tetszés szerinti idő elteltével.) A probléma másik részét a Világegyetem kezdeti állapotának megadása jelenti. Egyes vélekedések szerint a természettudománynak kizárólag a probléma első részével kell törődnie, a kezdeti állapot kérdését ugyanis a metafizika vagy a vallás birodalmába utalják. Szerintük a mindenható Isten tetszése szerinti módon indíthatta útnak a Világegyetem fejlődését. Lehetséges, hogy így történt, de ebben az esetben Istennek az is hatalmában állhatott volna, hogy a Világegyetem további fejlődése önkényes módon menjen végbe. Mégis úgy tűnik, hogy Isten a fejlődés teljesen szabályszerű, bizonyos törvényeknek engedelmeskedő útját választotta. Ezért éppoly ésszerűnek látszik az a feltevés is, amely szerint a kezdeti állapotot ugyancsak természeti törvények szabták meg.



Az atomoktól a galaxisokig.

A XX. század első felében a fizikusok jócskán kiterjesztették elméleteik hatókörét. Isaac Newton hétköznapi világán túl immár a Világegyetem legkisebb és legnagyobb objektumaival is foglalkoztak.

Felettébb nehéznek bizonyult azonban egyetlen olyan elméletet megalkotni, amely a Világegyetem összes jelenségét leírja. Ehelyett kisebb darabokra bontjuk a feladatot, és számos részelméletet alkotunk. Ezek mindegyike a megfigyelések korlátozott körét írja csak le, és azokra vonatkozóan tesz kijelentéseket. A további mennyiségek hatását figyelmen kívül hagyják, vagy azokat a mennyiségeket egyszerű számcsoporthal helyettesítik. Lehetséges azonban, hogy ez a megközelítésmód teljes egészében hibás. Ha a Világegyetemben minden mindennel alapvető összefüggésben áll, akkor talán elvi lehetetlenség úgy közelebb jutni a teljes probléma megoldásához, hogy egymástól elszigetelten vizsgáljuk a probléma különböző részeit. Mindamellett a múltban mégiscsak ezzel a módszerrel sikerült minden eredményünket elérni. Klasszikus példaként ismét Newton gravitációelméletét említhetjük, amely kimondja, hogy bármely két test között fellépő gravitációs erő kizárólag a testekhez tartozó egy-egy szám értékétől, és pedig a testek tömegétől függ, teljesen független azonban például attól, hogy milyen anyagból állnak a szóban forgó testek. Ennek köszönhetően nincs szükségünk a Nap és a bolygók anyagi összetételét és belső szerkezetét leíró elméletekre akkor, ha csak egymás körüli keringési pályájukat akarjuk kiszámítani.

Jelenleg a tudósok a Világegyetemet két alapvető részelmélet, az általános relativitáselmélet és a kvantummechanika^{*} fogalmaival írják le. E két elmélet a XX. század első felének két óriási szellemi teljesítménye. Az általános relativitáselmélet a gravitációs erőt és a Világegyetem nagy léptékű szerkezetét írja le, vagyis a néhány kilométerestől a milliószor milliószor millió (ebben a számban az 1-est huszonnégy nulla követi) kilométeresig terjedő szerkezetek világát, ahol az utóbbi nagyság már a megfigyelhető Világegyetem kiterjedésének felel meg. A kvantummechanika viszont a rendkívül parányi dolgok világának jelenségeivel foglalkozik, itt a jellemző méretek csak a milliméter milliomod részének a milliomod részével fejezhetők ki. Sajnálatos módon

jelenlegi ismereteink szerint a két elmélet összeegyeztethetetlen egymással – vagyis nem lehet egyidejűleg mindkettő helyes. Korunk fizikájának egyik legnagyobb vállalkozása – és egyben könyvünk fő témája – annak az új elméletnek a keresése, amely mindkettőt magába foglalja: vagyis a gravitáció kvantumelmélete. Jelenleg még nem áll rendelkezésünkre ez az elmélet, sőt, talán még felettébb hosszú utat kell bejárunk, mire sikerül megalkotnunk, ugyanakkor a megalkotandó új elmélet számos tulajdonságát mégiscsak ismerjük. A későbbi fejezetekben látni fogjuk, már arról is meglehetősen sokat tudunk, milyen előrejelzéseket kellene megadnia a gravitáció kvantumelméletének.

Ha azt a nézetet fogadjuk el, hogy a Világegyetemet meghatározott törvények irányítják, akkor végső soron a felállított részelméleteket valamiképpen össze kell gyúrni egy teljes, egyesített elméletté, amely a Világegyetem összes objektumát és jelenségét leírja. Ennek az egyesített elméletnek a felállítása közben azonban egy alapvető paradoxonba botlunk. A tudományos elméletekkel szemben támasztott, fentebb vázolt követelményeink úgy tekintik, hogy racionális lények vagyunk, akik tetszés szerint, szabadon megfigyelhetik a Világegyetemet, majd megfigyeléseikből különféle logikus következtetéseket vonhatnak le. Ebben a helyzetben ésszerű azt feltételezni, hogy egyre közelebb juthatunk a Világegyetemünket irányító törvények megismeréséhez. Ha viszont valóban létezne egy teljes, egyesített elmélet, akkor az feltehetően a mi cselekedeteinket is megszabná – vagyis maga az elmélet határozná meg, hogy mi lehetne a felállítására irányuló tevékenységünk eredménye! És vajon miért pont azt írná elő ez az elmélet, hogy az összegyűjtött bizonyítékokból a helyes következtetéseket vonjuk le? Nem lenne épp olyan magától értetődő, ha az elmélet azt követelné meg, hogy helytelen következtetésre jussunk? Vagy semmilyen konklúziót se tudjunk levonni?

Erre a problémára egyféleképpen válaszolhatunk, éspedig a Darwin-féle természetes szelekcióból kiindulva. Darwin elképzelése szerint minden önreprodukáló szervezetekből álló populációban fellépnek a genetikai anyag variációi, és ennek megfelelően különböző egyedek fejlődnek ki. Ezek a különbségek azt eredményezik, hogy némely egyedek másoknál jobban képesek a helyes következtetések

levonására az őket körülvevő világról, és arra, hogy ennek megfelelően cselekedjenek. Ezek az egyedek nagyobb valószínűséggel maradnak életben és szaporodnak, ezért viselkedési és gondolkodási mintájuk uralkodóvá válik. A múltban kétségkívül beigazolódott, hogy az általunk intelligenciának nevezett tulajdonság és a tudományos felfedezések túlélési előnyt biztosítottak. Egyáltalában nem magától értetődő azonban, hogy ez még ma is így van, korunk tudományos felfedezései ugyanis alkalmasak arra, hogy akár egész fajunkat elpusztítsuk. Ha ezt el is kerüljük, akkor sem nyilvánvaló, hogy a Világegyetem teljes, egyesített elmélete akár a legcsekélyebb mértékben is megváltoztatná túlélési esélyeinket. Feltételezve azonban, hogy a Világegyetem szabályszerűen fejlődött, joggal számíthatunk arra, hogy a természetes kiválogatódásnak köszönhetően kifejlődött érvelési készségünk akkor is a birtokunkban lesz, amikor az egyesített elméletet keressük, így elkerülhetjük a helytelen következtetéseket.

Minthogy a már rendelkezésünkre álló, részleges elméletek a legszélsőségesebb eseteket kivéve elegendőek a pontos előrejelzések készítéséhez, a Világegyetem végső elmélete keresésének szükségességét meglehetősen nehéznek tűnik gyakorlati érvekkel alátámasztani. (Érdemes azonban megjegyezni, hogy hasonló érveket annak idején a relativitáselmélettel vagy a kvantummechanikával szemben is fel lehetett volna sorakoztatni, ám később kiderült, hogy ezeknek az elméleteknek köszönhetjük a nukleáris energiát és a mikroelektronika forradalmát.) A mindenre kiterjedő, egyesített elmélet ezek szerint tehát nem segíti elő fajunk túlélését. Talán életünk minőségére sem lenne hatással. Az emberek azonban a civilizáció hajnala óta sohasem nyugodtak bele abba, hogy az események egymástól függetlenek és megmagyarázhatatlanok. Mindig is arra vágytunk, hogy megértsük a világ működése mögött fellelhető rendet. Ma is égünk a vágytól, hogy megtudjuk, miért vagyunk itt, és honnan jöttünk. Az emberiség mélyen gyökerező tudásvágya elegendő alátámasztást nyújt ehhez a kutatáshoz. Célunk pedig nem kevesebb, mint annak a Világegyetemennek a maradéktalan leírása, amelyben élünk.

NEGYEDIK FEJEZET

Newton Világegyeteme

A testek mozgásáról alkotott jelenlegi elképzeléseink Galilei és Newton koráig nyúlnak vissza. Őket megelőzően az emberek Arisztotelész tanításában hittek, aki azt állította, hogy a testek természetes állapota a nyugalom, ezért csak akkor mozognak, ha valamilyen erő vagy lökés erre készteti őket. Ebből az is következett, hogy a nehezebb testeknek gyorsabban kell leesniük a könnyebbeknél, hiszen nagyobb erővel vonzza őket a Föld. Az arisztotelészi tanítás részét alkotta az a vélekedés is, miszerint a Világegyetemet irányító törvényszerűségekre pusztán gondolkodás útján rá lehet jönni, vagyis szükségtelen elképzeléseinket megfigyelésekkel ellenőrizni. Ezért egészen Galileiig senki sem törődött azzal, hogy meggyőződjön arról, valóban különböző sebességgel esnek-e a különböző súlyú* tárgyak. A legenda szerint Galilei kísérletekkel igazolta, hogy Arisztotelész nézete helytelen. A bizonyításhoz különböző súlyokat ejtett le a pisai ferde toronyból. Ez a történet ebben a formában csaknem bizonyosan nem igaz, kétségtelen tény viszont, hogy Galilei végzett ehhez hasonló kísérleteket: különböző súlyú golyókat gurított le egy lejtőn. Fizikailag a helyzet hasonló a függőlegesen szabadon eső testek mozgásához, azonban könnyebb a jelenséget megfigyelni, mert kisebbek a sebességek. Galilei mérései azt bizonyították, hogy minden test sebessége pontosan azonos ütemben növekedett, függetlenül attól, mekkora volt a súlya. Ha például egy olyan lejtőn engedünk el egy golyót, amelyik tízméterenként egy métert süllyed, akkor a mozgás első másodperce végén a golyó sebessége kb. 1 m/s lesz, a második másodperc végén 2 m/s és így tovább, függetlenül a golyó súlyától. Természetesen egy ólomsúly gyorsabban esik le, mint egy madártoll, de csak azért, mert a madártoll esését számottevő mértékben fékezi a levegő ellenállása. Ha két olyan testet ejtünk le, amelyeknél egyaránt elhanyagolható a közegellenállás, például két különböző súlyú ólomdarabot, akkor azok pontosan egyszerre fognak földet érni. (Rövidesen azt is látni fogjuk, miért.) A Holdon nincs levegő, ami lassítaná a testek zuhanását. Ezért David R. Scott űrhajós a Hold felszínén is

elvégezte egy madártollal és kalapáccsal az említett kísérletet, és megállapította, hogy a két tárgy valóban pontosan egyszerre ért le a Hold felszínére.

Galilei mérési eredményeit Newton is felhasználta mozgástörvényei kidolgozásakor. Galilei kísérleteiben, amikor a test legurul a lejtőn, akkor mindig ugyanakkora erő hat rá (a súlya), aminek eredményeképpen állandó ütemben gyorsul. Ez azt mutatja, hogy az erő valódi hatása a test sebességének a megváltoztatása, nem pedig mozgásba hozása (vagy a mozgás fenntartása), amint azt korábban gondolták. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy mihelyt semmiféle erő sem hat a testre, az attól a pillanattól kezdve egyenes vonalú és állandó sebességű mozgást fog végezni. Ezt az elgondolást explicit formában először Newton fejtette ki 1687-ben, korábban már említett Principia című művében. Ezt a megállapítást nevezzük Newton első mozgástörvényének. Newton második törvénye pedig azt írja le, mi történik a testekkel, ha valamilyen erő hat rájuk. E törvény értelmében erő hatására a testek gyorsuló mozgást végeznek, vagyis megváltoztatják sebességüket, méghozzá oly módon, hogy a sebesség megváltozásának a mértéke arányos a ható erővel. (Ha tehát kétszer akkora erő hat, akkor a fellépő gyorsulás^{*} is kétszer akkora lesz.) A gyorsulás (állandó erő esetén) annál kisebb, minél nagyobb a test tömege (a testet alkotó anyag mennyisége). (Ha ugyanaz az erő kétszer nagyobb tömegű testre hat, akkor csak feleakkora gyorsulást hoz létre.) Jól ismert példa a törvény működésére az autó mozgása: minél nagyobb teljesítményű motor van a kocsinkban, annál nagyobb gyorsulás érhető el, egy adott motor esetében viszont a kocsik annál kevésbé képesek gyorsulni, minél jobban meg van rakva.

A testek erőhatásokra történő reagálását leíró mozgástörvények mellett meg kell említenünk Newton gravitációs törvényét is, amely kimondja, hogyan kell kiszámítanunk egy meghatározott erő, a gravitáció nagyságát. Mint már említettük, a törvény azt állítja, hogy minden test minden másikat vonz, mégpedig a két test mindegyikének tömegével arányos nagyságú erővel. Eszerint tehát ha az egyik (mondjuk az A-val jelölt) test tömegét megkétszerezzük, akkor a két test között ható gravitációs erő is a kétszeresére nő. Ez pontosan megfelel a várakozásainknak, hiszen az új A testet úgy

képzeltük el, mint ami két részből áll, amely részek mindegyikének a tömege megegyezik az eredeti test tömegével. E két test mindegyike az eredeti nagyságú erővel vonzza a B testet. Ennek megfelelően az A és B között ható teljes erő éppen kétszerese lesz az eredeti erőnek. Ha pedig, mondjuk, az egyik test tömege hatszor nagyobb, vagy pedig az egyik tömege a háromszorosára, a másiké a kétszeresére nő, akkor a közöttük ható gravitációs erő mindkét esetben egyformán a hatszorosa lesz az eredetinek.

Most már azt is könnyen beláthatjuk, miért esnek a testek mindig azonos gyorsulással. Newton gravitációs törvénye értelmében a kétszer nagyobb tömegű testre kétszer nagyobb gravitációs vonzást gyakorol a Föld. Ám mivel ennek a testnek kétszer nagyobb a tömege, Newton második törvénye értelmében egységnyi erő hatására csak feleannyira gyorsul.



Gravitációs vonzás egyesült erővel.

Ha egy test tömegét megkétszerezzük, akkor az általa kifejtett gravitációs vonzás is a kétszeresére nő.

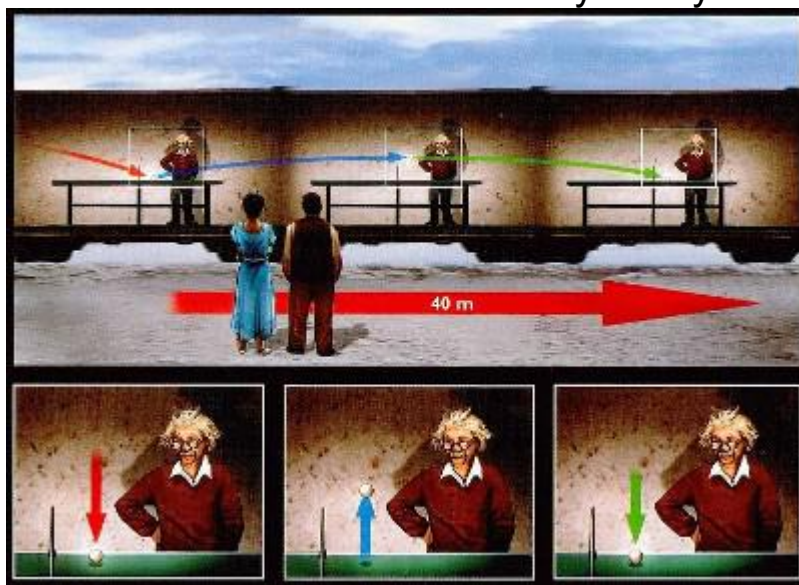
Vagyis Newton törvényei értelmében a két hatás pontosan kiegyenlíti egymást (ahányszor nagyobb a tömeg, annyszor nagyobb az erő, de annyszor kevésbé gyorsul adott erő hatására), ezért az elejtett testek súlyuktól függetlenül mindig pontosan ugyanakkora gyorsulással esnek.

Newton gravitációs törvénye azt is állítja, hogy minél távolabb vannak egymástól a testek, annál kisebb a közöttük fellépő gravitációs erő. A törvény szerint egy kiszemelt csillag által kifejtett

gravitációs erő éppen negyedakkora, mint egy ugyanakkora tömegű, de feleakkora távolságban lévő csillag gravitációs vonzása. A törvény alapján nagyon pontosan kiszámítható a Föld, a Hold és a bolygók pályája. Ha a vonzóerő nagysága nem a távolság négyzetével arányosan csökkenne, hanem annál gyorsabban vagy lassabban, akkor a bolygók nem ellipszis alakú pályákon keringenének, pályájuk bonyolult, nem záródó görbe lehetne, vagy spirális pályákon bezuhannának a Napba.

Arisztotelész, illetve Galilei és Newton felfogása között az a legalapvetőbb különbség, hogy Arisztotelész hitt a nyugalmi állapot kitüntetett voltában, így szerinte minden test előbb-utóbb nyugalomba jutna, ha nem hatna rá valamilyen mozgásban tartó erő vagy lökés. Ő például úgy gondolta, hogy a Föld nyugalomban van. Newton törvényeiből következően azonban nem létezik kitüntetett nyugalmi állapot. Teljes joggal mondhatjuk például, hogy az A test nyugalomban van, miközben a B test hozzá képest állandó sebességgel mozog, ám ugyanilyen helyes az a megfogalmazás is, miszerint a B test van nyugalomban, és az A test mozog hozzá képest. Ha például egy pillanatra figyelmen kívül hagyjuk a Föld tengely körüli forgását és Nap körüli keringését, akkor azt mondhatjuk, hogy a Föld nyugalomban van, és egy vonat a felszínén észak felé halad 150 km/óra sebességgel. Ugyanilyen joggal azonban azt is állíthatjuk, hogy a vonat nyugalomban van (áll), miközben a Föld hozzá képest 150 km/óra sebességgel halad dél felé. Ha a szóban forgó vonaton utazás közben különböző mozgó testekkel fizikai kísérleteket végeznénk, akkor Newton törvényeit változatlanul érvényeseknek találnánk. Vajon Newtonnak van igaza, vagy Arisztotelésznek, és miként lehet dönteni a két felfogás között? Az egyik döntő kísérlet a következő lehet. Képzeljük el, hogy be vagyunk zárva egy dobozba, de nem tudjuk, hogy a doboz egy mozgó vonatban van, vagy a Föld felszínén, ahol az utóbbi helyzet felel meg az Arisztotelész nézete szerinti nyugalmi állapotnak. Van-e lehetőségünk annak eldöntésére, hol van valójában a doboz? Ha igen, akkor talán Arisztotelésznek igaza volt – a Földhöz képest nyugvó helyzetnek kitüntetett szerepe van. Ám a valóság az, hogy ha a mozgó vonatra tett dobozban végezzük el a kísérleteinket, azok akkor is ugyanazt az eredményt fogják adni, mintha a doboz a sínek

mellett, az „álló” peronon lenne (feltételezve, hogy nincsenek zökkenők, kanyarok vagy egyéb tökéletlenségek a vasúti sínen). Ha pingpongozni kezdünk a vonaton, akkor azt fogjuk tapasztalni, hogy a labda pontosan ugyanúgy viselkedik, mintha a vasúti sín mellé tett asztalon játszanánk. Ha pedig a dobozban vagyunk, és úgy játszunk, hogy a vonat nulla, ötven, száz, majd százötven km/óra állandó sebességgel mozog, akkor a labda mind a négy helyzetben ugyanúgy viselkedik. Így viselkedik ugyanis a világunk, és ezt fejezi ki Newton törvényeinek matematikai formába öntött változata: nincs lehetőségünk eldönteni, hogy a vonat mozog, vagy pedig a Föld. A mozgás fogalma csakis más testekhez viszonyítva nyer értelmet.



A távolság relativitása.

A test által megtett út – és ezzel együtt a mozgás pályája – a különböző megfigyelők számára különbözőnek látszik.

De vajon mit számít az, hogy Arisztotelésznek vagy Newtonnak van-e igaza? Vajon a különbség csupán szemléletbeli, filozófiai – vagy a természettudomány egésze szempontjából fontos eltérésről van szó? Nos, az abszolút nyugalmi állapot hiányának mélyenszántó következményei vannak a fizikában: ez azt jelenti ugyanis, hogy két, különböző időpontban történt eseményről* nem tudjuk eldönteni, ugyanott történtek-e, vagy sem.

Tegyük ezt szemléletessé az előző példánk segítségével. Ha valaki a vonaton úgy üti meg a pingponglabdát, hogy az pontosan függőlegesen mozogva néhányat pattog az asztal és a plafon (a

doboz teteje) között, akkor mondjuk egy másodperc különbséggel, kétszer egymás után, az asztal ugyanazon pontjáról pattan vissza. Az asztal mellett álló megfigyelő szempontjából e két pont térbeli távolsága természetesen nulla. A vasúti pálya mellett álló megfigyelő viszont azt látja, hogy a két pont egymástól mintegy negyven méter távolságban van, ennyit tesz meg ugyanis a vonat a két visszapattanás közötti egy másodperc alatt. Newton szerint a két megfigyelő mindegyike egyforma joggal tekinti saját magát nyugalomban lévőnek, ezért mindkét megfigyelést el kell fogadnunk. Egyiket sem részesíthetjük előnyben a másikkal szemben, amint az Arisztotelész felfogásából következne. Az események megfigyelt pozícióit és az azok közötti távolságot eltérőnek látja a vonaton utazó és a sínek mellett álló személy, miközben semmiféle érv nem hozható fel amellett, hogy bármelyikük megfigyelését előnyben kellene részesítenünk a másikéval szemben.

Newtont roppant aggasztotta az abszolút hely, illetve az abszolút tér hiánya, mert az nem állt összhangban az abszolút Istenről vallott felfogásával. Valójában Newton soha nem fogadta el az abszolút tér hiányát, bár ez éppen az ő törvényeiből következett. Ezen irracionális felfogása miatt sokan bírálták, elsősorban George Berkeley püspök, a filozófus, aki úgy vélte, hogy a tér, az idő és benne minden anyagi test csupán illúzió. Amikor a híres dr. Johnsonnak beszámoltak Berkeley nézeteiről – Akkor most megcáfolom! felkiáltással – teljes erőből belerúgott egy nagy kőbe.

Arisztotelész és Newton egyaránt hitt az abszolút időben. Hitték tehát, hogy két esemény közötti időtartam egyértelműen megmérhető, és a mérés eredménye mindig ugyanaz lesz, függetlenül a megfigyelő személyétől, feltéve persze, hogy a méréshez használt óra pontosan jár. Az abszolút térrel ellentétben az abszolút idő fogalma összeegyeztethető volt Newton törvényeivel. Ez éppen az, amit a legtöbb ember a józan ész által diktált felfogásnak tart. A XX. századi fizikusok azonban felismerték, hogy meg kell változtatniuk a térről és az időről kialakult felfogást. Amint látni fogjuk, felismerték, hogy az események közötti időtartam hossza éppúgy a megfigyelőtől függ, mint a pingponglabdás példával szemléltetett esetben a pontok közötti távolság. Arra is rájöttek, hogy az idő nem teljesen független a tértől, és ezért teljesen

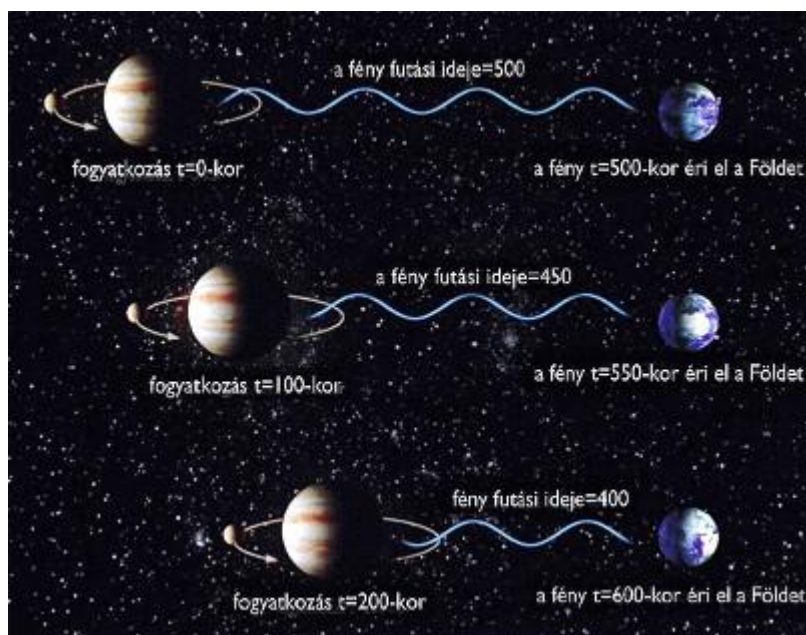
el sem választható attól. E felismerések kulcsát a fény tulajdonságaival kapcsolatos új felismerések jelentették. Ezek talán ellentmondani látszanak hétköznapi tapasztalatainknak, de ennek az az oka, hogy a mindennapi tapasztalatainkon edződött józan eszünk megbízhatóan működik, amikor almákról, bolygókról, vagy egyéb, viszonylag lassan mozgó tárgyakról van szó, azonban teljességgel csődöt mond, amikor a fényéhez közeli sebességgel mozgó testekkel kell foglalkoznunk.

ÖTÖDIK FEJEZET

Relativitáselmélet

Olaf Christensen Römer dán csillagász 1676-ban ismerte fel, hogy a fény véges, bár roppant nagy sebességgel terjed. Ha megfigyeljük a Jupiter holdjait, akkor észrevesszük, hogy időről időre részben vagy teljesen eltűnnek a szemünk előtt, mert áthaladnak az óriásbolygó korongja mögött. A Jupiter-holdak fogyatkozásainak szabályos időközönként kellene bekövetkezniük, Römer azonban észrevette, hogy a fogyatkozások nem egyenlő időközönként következnek be. Talán a holdak néha gyorsulnak, máskor pedig lassulnak a pályájuk mentén? Nos, Römer más magyarázatot adott. Ha a fény végtelen sebességgel terjedne, akkor a Földről szabályos időközönként látnánk a fogyatkozásokat, pontosan abban a pillanatban, amikor ténylegesen bekövetkeznek, mintha csak valamiféle kozmikus óra ketyegését hallanánk. Minthogy ebben az esetben a fény bármekkora távolságot pillanatszerűen futna be, a helyzet nem változna, akár földközeli, akár földtávolban van a Jupiter. Képzeljük most el, mi történik, ha a fény véges sebességgel terjed. Ebben az esetben minden fogyatkozást valamivel később látunk, mint amikor ténylegesen bekövetkezik. A késés nagyságát a fény sebességének és a Jupiter és a Föld közötti távolságnak a hányadosaként számíthatjuk ki. Ha a Jupiter állandó távolságra lenne a Földtől, akkor az időkéésés minden fogyatkozás esetében ugyanakkora lenne. A Jupiter azonban néha közeledik a Föld felé. Ennek következtében az egymást követő fogyatkozások „jeleinek” egyre kisebb távolságot kell befutniuk, vagyis egyre hamarabb érkeznek ahhoz képest, mintha a Jupiter változatlan távolságban

maradt volna. Hasonló gondolatmenettel belátható, hogy amikor a Jupiter távolodik a Földtől, akkor a fogyatkozásokat egyre nagyobb késéssel látjuk. Az időpontok korábbra, illetve későbbre tolódásának a mértéke a fény sebességétől függ, a jelenség tehát lehetővé teszi a fénysebesség mérését. Römer észrevette, hogy a Jupiter holdjainak fogyatkozásai az évnek azon időszakában következnek be egyre hamarabb, amikor a Föld közeledett a Jupiter felé, illetve olyankor látszóttak egyre nagyobb késéssel, amikor távolodtunk a Jupitertől. Az időkülönbségekből ki tudta számítani a fénysebességet. A Föld és a Jupiter közötti távolság változásait azonban nem tudta túlságosan pontosan kiszámítani, ezért a fény sebességére csak 224000 km/s-ot kapott, szemben a ma elfogadott 300000 km/s sebességgel. Mindamellett Römer eredménye figyelemre méltó volt, nemcsak azért, mert bebizonyította, hogy a fény véges sebességgel terjed, hanem azért is, mert mindezt tizenegy évvel Newton Principiájának megjelenése előtt sikerült elérnie.



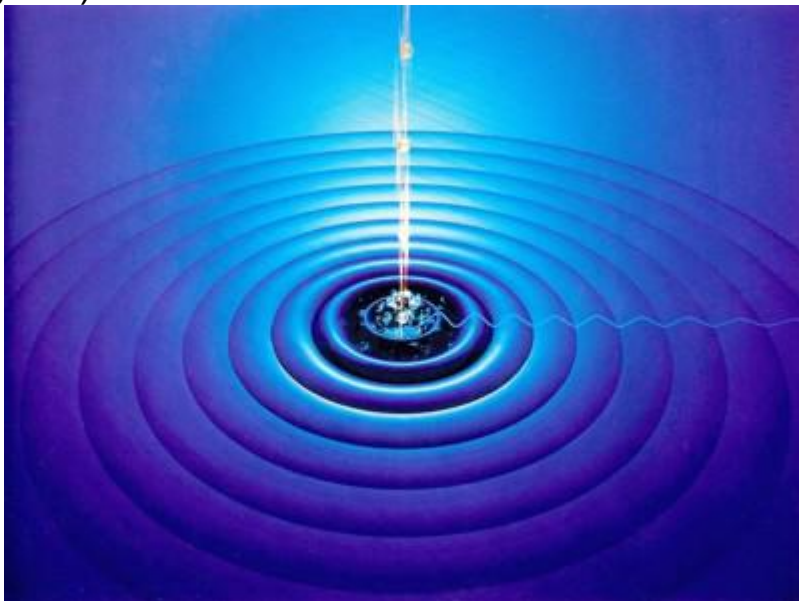
A fény sebessége és a fogyatkozások időpontja.

A Jupiter holdjai fogyatkozásainak megfigyelt időpontja egyrészt a jelenség bekövetkezésének tényleges időpontjától függ, másrészt attól, hogy mennyi idő alatt ér el a fény a Jupitertől a Földre. Ennek megfelelően a fogyatkozások gyakoribbaknak látszanak, amikor a Jupiter közeledik a Föld felé, viszont ritkábbak, amikor távolodik

tőlünk. A jelenséget itt az érthetőség kedvéért erősen eltúlozva ábrázoltuk.

A fény terjedésének helyes elméletére azonban egészen 1865-ig kellett várni, amikor James Clerk Maxwell skót fizikusnak sikerült egyesítenie azokat a részelméleteket, amelyekkel korábban az elektromos, illetve a mágneses erők működését leírták. Bár mind az elektromosságot, mind a mágnességet már az ókorban is ismerték, Henry Cavendish brit kémikus és Charles-Augustin de Coulomb francia fizikus csak a XVIII. században írta fel kvantitatív formában a két elektromosan töltött test között fellépő erőhatás törvényszerűségeit. Néhány évtizeddel később, a XIX. század elején számos fizikus írt fel hasonló törvényeket a mágneses erőkre. Maxwell matematikai úton kimutatta, hogy ezek az elektromos és mágneses erők nem a részecskék egymással való közvetlen kölcsönhatásának eredményeképpen lépnek fel, hanem azért, mert minden elektromos töltés^{*} és áram az őt körülvevő térben olyan mezőt^{*} alakít ki, amely azután erőt fejt ki minden más, ebben a térrészben elhelyezkedő töltésre és az ott folyó áramokra. Megállapította, hogy egyetlen mező hordozza az elektromos és a mágneses erőket, következésképpen az elektromosság és a mágnesség ugyanannak az erőnek az egymástól elválaszthatatlan megnyilvánulásai. Ezt az erőt elektromágneses erőnek^{*}, az azt hordozó mezőt pedig elektromágneses mezőnek^{*} nevezte el. Maxwell egyenletei megjósolták, hogy az elektromágneses mezőben hullámszerű zavarok létezhetnek, amelyek egy tó felszínén kialakuló víz hullámokhoz hasonlóan állandó sebességgel haladnak. Amikor kiszámította ennek a sebességnek a nagyságát, megállapította, hogy az pontosan megegyezik a fény sebességével! Ma már tudjuk, hogy Maxwell hullámai fény formájában szabad szemmel is láthatóak, feltéve, hogy hullámhosszuk^{*} a milliméter négyszáz és nyolcszáz milliommód része közé esik. (A hullám hullámhegyek és hullámvölgyek sorozatából áll, a hullámhossz a szomszédos hullámhegyek vagy hullámvölgyek közötti távolság.) A látható fényénél rövidebb hullámhosszú hullámokat ibolyántúli fényként, röntgensugárzásként és gammasugárzásként^{*} ismerjük. A nagyobb hullámhosszú hullámok a rádióhullámok (egy méternél nagyobb

hullámhosszal), a mikrohullámok (1 cm körül) és az infravörös sugárzás (ennek hullámhossza a milliméternél kisebb, de a látható fényénél nagyobb).

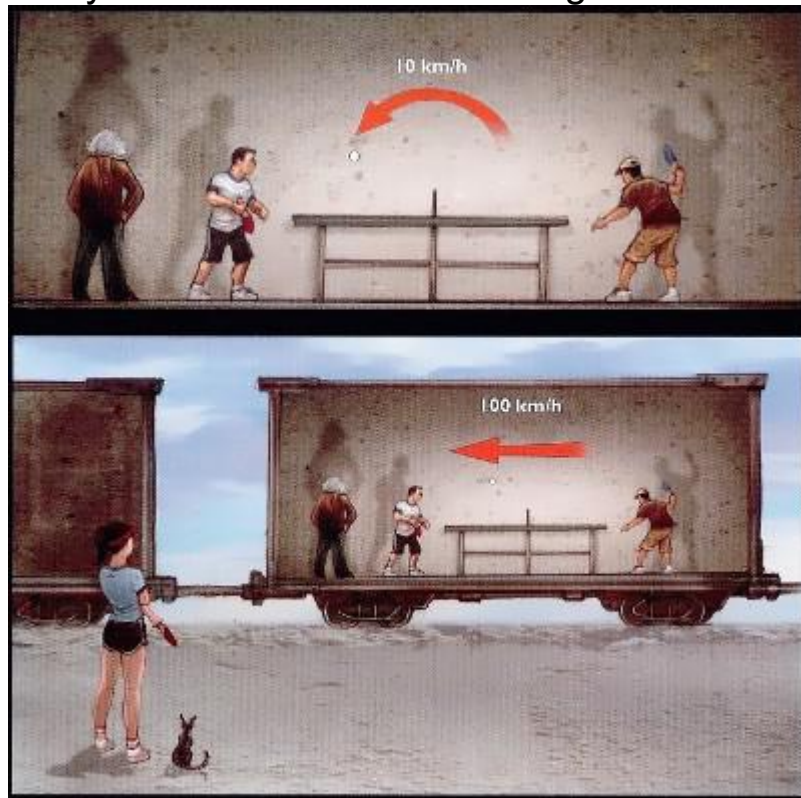


Hullámhossz.

A hullám hullámhossza az egymást követő hullámhegyek vagy hullámvölgyek közötti távolság.

Maxwell elméletéből tehát az következett, hogy a rádióhullámok vagy a fény meghatározott, állandó sebességgel terjednek. Ezt azonban nehéz volt összeegyeztetni Newton elméletével, amely szerint nem létezik abszolút nyugalom, mert ha nincs ilyen viszonyítási alap, akkor nem jöhet létre általános egyetértés arra nézve, mekkora valamely objektum sebessége. Ennek megértéséhez ismét képzeljük el, hogy a vonaton pingpongozunk. Ha a labdát a vonat eleje felé üjtük meg, ellenfelünk által 15 km/órának mért sebességgel, akkor arra számíthatunk, hogy a sínek mellett álló megfigyelő 165 km/óra sebességgel látja a labdát repülni – 15 km/óra a labda sebessége a vonathoz képest, ami hozzáadódik a vonat 150 km/órás, a peronhoz képesti sebességéhez. Mekkora hát a labda sebessége, 15 km/óra, vagy 165 km/óra? Hogyan definiáljuk a labda sebességét, a vonathoz képest, vagy a Földhöz képest? Ha nem létezik abszolút nyugalom, akkor nem tudunk a labda mozgásához hozzárendelni egy abszolút sebességet. Ugyanannak a labdának a sebessége bármekkora lehet, attól függően, milyen vonatkoztatási rendszert választunk, mihez

viszonyítjuk a sebességét. Newton elmélete szerint ugyanez az okfejtés érvényes a fényre is. Akkor hát mit jelent Maxwell elméletében a fényhullámok állandó sebessége?



Különböző sebességű pingponglabdák.

A relativitáselmélet szerint a tárgy sebességére vonatkozóan minden megfigyelő mérési eredményét egyformán helyesnek kell tekinteni, annak ellenére, hogy az adatok nem egyeznek egymással.

Annak érdekében, hogy Maxwell elméletét össze lehessen egyeztetni Newton törvényeivel, egyesek feltételezték egy „éter”-nek nevezett, mindent, még az „üres” térben található vákuumot is kitöltő közeg létezését. Az éter gondolata különösen szimpatikus volt azon tudósok számára, akik úgy gondolták, hogy amint a víz hullámok terjedéséhez vízre, a hang hullámokéhoz pedig levegőre van szükség, éppúgy az elektromágneses hullámok terjedéséhez is szükség van valamilyen hordozó, továbbító közegre. Ezen elképzelés szerint a fény hullámok ugyanúgy terjednek az éterben, mint a hang hullámok a levegőben, azzal a különbséggel, hogy az éterhez képest mért „sebességük” levezethető a Maxwell-egyenletekből, és kísérleti úton meghatározható. Eszerint a különböző megfigyelők különböző sebességűnek éreznék a feléjük

tartó fényt, ám az éterhez képest mért fénysebesség állandó nagyságú maradna.

Az elgondolást ellenőrizni lehetett. Képzeliünk el egy fényforrás által kibocsátott fénysugarat. Az éterelmélet szerint a fény fénysebességgel halad az éterben. Ha az éteren keresztül a fényforrás felé mozgunk, akkor a fénysugár a mi éterhez képest mért sebességünk és a fény éterhez képest mért sebessége összegével közeledik felénk. A fény tehát gyorsabban közeledik felénk, mintha nem mozognánk, vagy valamilyen más irányba mennénk. Minthogy a fény sebessége elképesztően nagy ahhoz a sebességhez képest, amilyen gyorsan mi az éterhez képest mozoghatunk, a sebességkülönbséget nagyon nehéz megmérni.

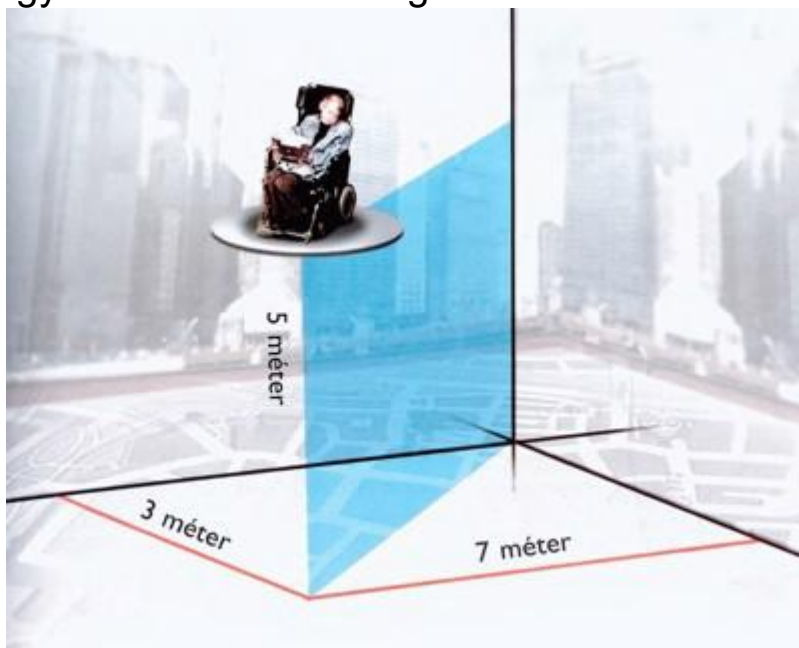
Albert Michelson (aki később az első amerikai Nobel-díjas lett) és Edward Morley 1887-ben végrehajtott egy nagyon gondosan kivitelezett, bonyolult kísérletet. Felismerték, hogy mivel a Föld mintegy 30 km/s sebességgel mozog a Nap körüli pályáján, egész laboratóriumuk is ugyanekkora, tehát viszonylag nagy sebességgel mozog az éterhez képest. Természetesen senki sem tudta, milyen irányban és milyen gyorsan mozoghat az éter a Naphoz képest, illetve azt, hogy mozog-e egyáltalán. Ám ha a kísérletet különböző évszakokban megismétljük, akkor remélhetjük, hogy ki tudjuk küszöbölni ezt az ismeretlen tényezőt. Ezért Michelson és Morley olyan kísérleti elrendezést tervezett, amelyben össze lehetett hasonlítani a Föld éterbeli mozgásának irányával egyező irányban haladó fénysugár sebességét a rá merőleges irányú fénysugár sebességével. (Az első esetben a fényforrás felé mozgottunk, a második esetben viszont nem.) Legnagyobb meglepetésükre azt állapították meg, hogy a fény sebessége mindkét irányban pontosan ugyanakkora volt!

1887 és 1905 között még számos kísérletet tettek az éterhipotézis megmentésére. A legfigyelemreméltóbb Hendrik Lorentz holland fizikus nevéhez fűződik, aki azzal próbálta megmagyarázni a Michelson-Morley-kísérlet eredményét, hogy az éteren keresztül történő mozgás során a testek összenyomódnak, az órák pedig lassabban járnak. Egy 1905-ben megjelent, híres cikkében azonban a Svájci Szabadalmi Hivatal addig ismeretlen hivatalnoka, Albert Einstein kimutatta, hogy az éter fogalmának bevezetése teljesen

fölösleges, feltéve, hogy készek vagyunk elvetni az abszolút idő fogalmát (erre még később kitérünk). Egy nagy tekintélyű francia matematikus, Henri Poincaré néhány héttel később hasonló elképzelését vázolta. Einstein érvei azonban közelebb álltak a fizikusok gondolkodásmódjához, mint Poincaré nézetei, a francia ugyanis tisztán matematikai jellegűnek tekintette a problémát, és halála napjáig nem fogadta el az elmélet Einstein-féle értelmezését. Einstein úgynevezett relativitáselméletének alapvető posztulátuma azt állítja, hogy a természettudomány törvényeinek minden szabadon mozgó megfigyelő számára ugyanolyanoknak kell lenniük, függetlenül attól, milyen sebességgel mozog a megfigyelő. Ez igaz volt a Newton-féle mozgástörvényekre, ám Einstein az elgondolást a Maxwell-egyenletekre is kiterjesztette. Más szavakkal, minthogy Maxwell elmélete szerint a fénysebesség adott, állandó nagyságú, ezért minden szabadon mozgó megfigyelőnek ugyanakkorának kell mérnie, függetlenül attól, milyen sebességgel közeledik a fényforrás felé, vagy távolodik tőle. Ez az egyszerű gondolat természetesen magyarázatot adott arra, mit is jelent a fénysebesség a Maxwell-egyenletekben. Ehhez sem az éter, sem pedig bármiféle kitüntetett vonatkoztatási rendszer bevezetésére nem volt szüksége. Ugyanakkor az elgondolásnak volt néhány figyelemre méltó és az ösztönös szemléletünknek ellentmondó következménye.

Ha például megköveteljük, hogy minden megfigyelő pontosan ugyanakkorának lássa a fény sebességét, akkor kénytelenek vagyunk megváltoztatni az időről alkotott fogalmunkat. Gondoljunk ismét a robogó vonatra. A 4. fejezetben láttuk, hogy ha valaki a vonaton egy pingponglabdával „dekázik”, és esetleg csak pár deciméter magasba ütügeti fel a labdát, a peronon álló megfigyelő negyvenméteres másodpercenkénti sebességgel látja száguldani a labdát. Hasonlóképpen, ha a vonaton utazó megfigyelő felvillant egy zseblámpát, akkor a két megfigyelő eltérő értéket állapít meg a fénysugár által megtett útra. Mivel a sebesség a megtett út és a megtételéhez szükséges idő hányadosa, és a két megfigyelő különbözőnek mérte a fénysugár által megtett utat, csak úgy kaphatnak azonos eredményt a fény sebességére, ha különbözőnek mérik azt az időtartamot, amelyre a fénysugárnak a megfigyelt út megtételéhez szüksége volt. Másképpen kifejezve azt is

kijelenthetjük, hogy a relativitáselmélet megköveteli az abszolút idő fogalmának elvetését! Ehelyett minden megfigyelő számára a maga módján telik az idő, amelyet a magával vitt órával tud mérni. A különböző megfigyelők által magukkal vitt, egyébként teljesen azonos órák egymástól eltérő időt fognak mutatni.



Térbeli koordináták.*

Amikor azt állítjuk, hogy a tér háromdimenziós, akkor ezen azt értjük, hogy három szám, a három úgynevezett koordináta, egyértelműen meghatározza egy pont térbeli helyét. Ha leírásunkba az időt is beépítjük, akkor a tér helyett a négydimenziós téridővel* dolgozunk.*

A relativitáselméletben tehát nincs szükség az éter fogalmának bevezetésére, amely közeg jelenléte a Michelson-Morley-kísérlet bizonyosága szerint amúgy sem mutatható ki. Ezzel szemben a relativitáselmélet arra kényszerít, hogy alapvetően megváltoztassuk a térről és az időről alkotott elképzeléseinket. El kell fogadnunk, hogy az idő nem választható el teljesen a tértől és nem is független attól, hanem a két fogalmat valamiféleképpen az úgynevezett téridővé kell egyesítenünk. Ezeket a fogalmakat nem könnyű felfogni és megérteni. Évekre volt szükség, mire a relativitáselmélet legalább a fizikustársadalmon belül általánosan elfogadottá vált.

Csak a legnagyobb elismeréssel adózhatunk Einstein képzelőerejének, amiért képes volt ezt kiagyalni, és saját logikájába

vetett hitének, amiért annak ellenére képes volt kidolgozni az elmélet következményeit, hogy azok szemmel láthatóan meglehetősen szokatlan végeredményre vezettek.

A józan ész azt diktálja, hogy egy pont térbeli helyzetét három számmal, az úgynevezett koordinátákkal jellemezhetjük. Az mondhatjuk például, hogy egy pont a szobában hét méterre van az egyik faltól, három méterre a másiktól, és öt méterrel a padló fölött. Más koordináta-rendszerben a földrajzi hosszúsággal, szélességgel és a tengerszint fölötti magassággal adhatjuk meg valamely pont helyét. Tetszés szerinti koordináta-rendszert használhatunk, bár az egyes rendszereknek erősen eltérő a gyakorlati haszna. Nem lenne például célszerű a Hold helyét a Piccadilly Circustól észak és nyugat felé mérve kilométerekben, valamint a tengerszint fölötti magasságát méterekben megadni. Sokkal ésszerűbb, ha e helyett megadjuk a Naptól mért távolságát, a bolygók pályasíkjától mért (szög)távolságát, valamint azt, hogy a Napból nézve mekkora szögtávolságra látszana egy közeli csillagtól, mondjuk a Proxima Centauritól. Ám ezeknek a koordinátáknak sem vennénk túl sok hasznát, ha a Nap helyét szeretnénk megadni a Tejútrendszeren belül, vagy a Tejútrendszer helyét a galaxisok lokális csoportján belül. Valójában az egész Világegyetemet egymást átfedő és egymást tartalmazó foltok formájában írhatjuk le. Minden egyes foltban másik három koordinátát célszerű használni a pontok helyének megadására.

A relativitáselmélet által definiált téridőben minden eseményt – vagyis bármit, ami a tér egy adott helyén valamely időpontban történik – négy számmal, vagyis négy koordinátával azonosíthatunk. A koordináták megválasztása ebben az esetben is önkényes: bármilyen, jól meghatározott térbeli koordináta-rendszer mellett negyedik koordinátaként az időt használhatjuk, szintén tetszés szerinti rendszerben. Merőben más koordináta-rendszert is választhatunk azonban, az első térbeli koordinátaként például a régi első és második térbeli koordináta kombinációját választhatjuk, így ahelyett, hogy a Piccadillytől északra és nyugatra kilométerekben mért távolságokat használnánk, bevezethetjük a Piccadillytől északkelet és északnyugat felé mért távolságokat. Hasonlóképpen új időkoordinátát is bevezethetünk, például a régi (másodpercekben

mért) időkoordinátához hozzáadhatjuk a Piccadillytől észak felé (fénymásodpercekben^{*}) mért távolság és a fénysebesség hányadosát.

A relativitáselmélet másik jól ismert következménye a tömeg és az energia egyenértékűsége, amelyet legtömörebben Einstein híres, $E=mc^2$ formulája fejez ki (ahol E az energia, m a tömeg, c pedig a fénysebesség). Ezt az összefüggést leggyakrabban annak kiszámítására szokták használni, hogy mennyi energia szabadulna fel, ha adott tömegű anyagot teljes egészében elektromágneses sugárzássá tudnánk alakítani. (Minthogy a fény sebessége nagyon nagy szám, ezért ilyenkor óriási energiamennyiség szabadul fel – a Hirosimára ledobott, óriási pusztítást okozó atombomba felrobbanásakor kevesebb, mint 30 gramm anyag alakult sugárzássá.) A híres egyenlet azonban ezenkívül azt is tudtunkra adja, hogy ha megnő egy test energiája, akkor ennek következtében a tömege is nagyobb lesz, vagyis nagyobb mértékben ellenáll a gyorsításnak, ha meg akarjuk növelni a sebességét.

Az energia egyik formája a mozgási, vagy más néven kinetikus energia. Mint ahogy autónk mozgásba hozásához is energiára van szükség, ugyanígy energiát kell befektetnünk, ha bármely más test sebességét meg akarjuk növelni. A mozgó testek kinetikus energiája azzal az energiával egyenlő, amelyet a mozgás előidézéséhez be kellett fektetnünk. Eszerint tehát minél gyorsabban mozog egy test, annál nagyobb a mozgási energiája. A tömeg és az energia egyenértékűsége következtében azonban a mozgási energia hozzáadódik a test tömegéhez, vagyis egyre nehezebb lesz a test sebességét még tovább növelni.

A jelenség a fényét megközelítő sebességgel mozgó testek esetében válik számottevővé. Ha például egy objektum a fénysebesség 10 százalékával halad, akkor tömege csak 0,5 százalékkal nagyobb a normálisnál, ellenben a fénysebesség 90 százalékánál a tömege már a nyugalmi tömeg bő kétszerese lesz. Ahogy egyre közeledik az objektum sebessége a fénysebesség felé, úgy válik a tömeg növekedése egyre rohamosabbá, ezért egyre több energiát kell befektetnünk a további gyorsításához. A relativitáselmélet szerint egyetlen test sem érheti el a fénysebességet, mert addigra tömege már végtelenül naggyá válna,

így a tömeg és az energia egyenértékűsége értelmében ehhez végtelenül nagy mennyiségű energia befektetésére lenne szükség. Ez az oka annak, hogy a relativitáselmélet a közönséges testeket arra kényszeríti, hogy minidig csak a fényénél kisebb sebességgel mozoghassanak. Kizárólag a fény, és más, olyan hullámok, amelyeknek nincs eredendő (nyugalmi) tömegük, képesek fénysebességgel haladni.

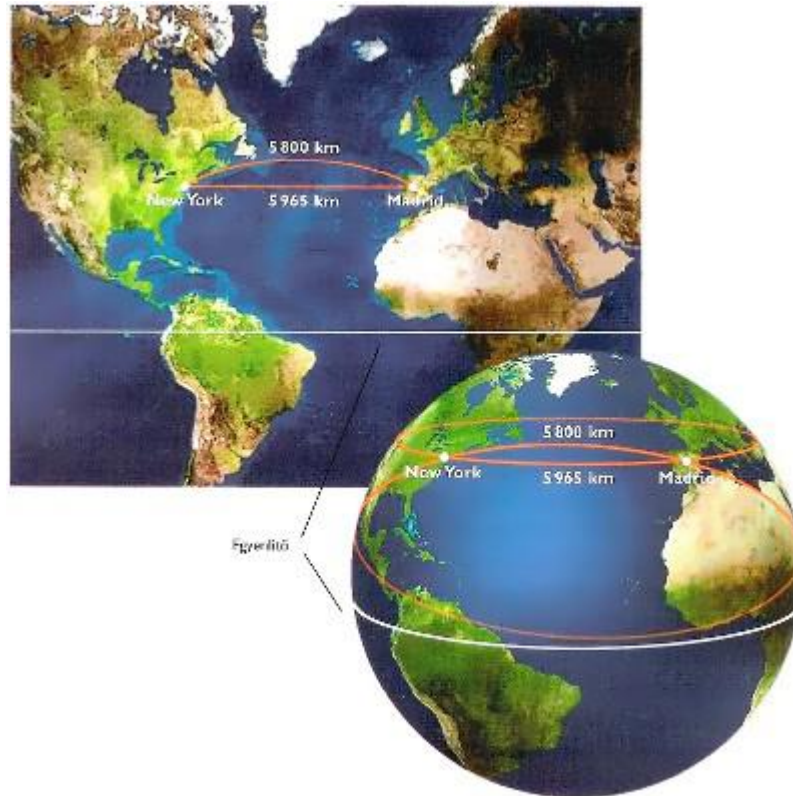
Einstein 1905-ben megalkotott relativitáselméletét speciális relativitáselméletnek^{*} nevezzük. Azért speciális, mert az elmélet sikeresen megmagyarázza ugyan, hogy a fénysebesség minden megfigyelő számára ugyanakkora, és helyesen értelmezi mindazon jelenségeket, amelyek a testek a fényéhez közeli sebességgel történő haladásakor fellépnek, ám nem egyeztethető össze Newton gravitációelméletével. Newton elmélete szerint egy adott időpontban az objektumok közötti vonzóerő a testek közötti pillanatnyi távolságtól függ. Ez azt jelenti, hogy ha elmozdítjuk az egyik testet, akkor a másikra ható gravitációs erő abban a pillanatban megváltozik. Ha mondjuk a Nap egyik pillanatról a másikra eltűnne, akkor Maxwell elmélete értelmében a Föld csak mintegy nyolc perccel később borulna sötétségbe (ennyi időbe telik ugyanis, mire a Napból kiinduló fénysugarak eléri a Földet), ezzel szemben a newtoni gravitációelmélet szerint a Föld a Nap eltűnésének pillanatában, tehát azonnal érzékelné, hogy megszűnt a Nap vonzóereje, ezért lerepülne a pályájáról. A Nap eltűnésének gravitációs hatása tehát végtelen sebességgel érne el bennünket, ahelyett, hogy a speciális relativitáselmélet követelményeinek megfelelően ez a sebesség is legfeljebb a fénysebességgel lenne egyenlő. Einstein 1908 és 1914 között számos alkalommal sikertelenül próbálkozott a speciális relativitáselmélettel összhangban álló gravitációelmélet megalkotásával. Végül 1915-ben sikerült elkészítenie azt az előzőnél is merészebb és forradalmibb elméletet, amelyet azóta általános relativitáselméletnek nevezünk.

HATODIK FEJEZET

Görbült tér

Einstein általános relativitáselmélete azon a forradalmi ötleten alapul, miszerint a gravitáció nem a többi erőhöz hasonló kölcsönhatás, hanem annak a ténynek a következménye, hogy a téridő nem sík, amint azt már korábban is feltételezték. Az általános relativitáselméletben a téridő görbült, ahol a görbület mértékét a tömeg és az energia eloszlása határozza meg. A testek, mint például a Föld, nem azért mozognak görbe vonalú pályán, mert a gravitációnak nevezett erő erre kényszeríti őket, hanem azért, mert az egyenes pálya görbült térbeli megfelelőjét követik. Az ilyen útvonalat geodetikus vonalnak^{*}, vagy röviden geodetikusnak nevezzük. Technikailag a geodetikust két, egymáshoz közeli pont közötti legrövidebb pályaként definiálhatjuk.

A geometriai sík lehet az egyik példa a kétdimenziós sík térre, amelyen a geodetikusok az egyenes vonalak. A Föld felszíne ezzel szemben kétdimenziós görbült tér. A Föld felszínén a geodetikus vonalakat főköröknek nevezzük. Az egyik ilyen főkör az Egyenlítő. Ehhez hasonlóan minden olyan, a Föld felszínére rajzolt kör főkör, amelynek középpontja egybeesik a Föld középpontjával. (A „főkör” kifejezés onnan ered, hogy ezek a legnagyobb átmérőjű körök, amelyet adott gömb felszínére rajzolhatunk.) Minthogy két repülőtér között mindig a geodetikus vonal jelenti a legrövidebb utat, a repülőgépek navigátorai ezek mentén irányítják a gépeket. New Yorkból Madridba például repülhetünk úgy, hogy az iránytűnket figyelve mindig pontosan kelet felé repülünk, és a két város közös földrajzi szélességi köre mentén haladunk, így 3707 mérföldet (5966 km-t) kell megtennünk. Ha viszont a két várost összekötő főkör mentén repülve északkelet felé indulunk, majd fokozatosan kelet, majd délkelet felé fordulunk, akkor a távolság csak 3605 mérföld (5802 km). Ha ezt a két útvonalat olyan térképre rajzoljuk rá, amelyik a Földet síkba kiterítve (tehát torzítva) ábrázolja, akkor a látvány félrevezető lesz. Amikor „egyenesen” kelet felé repülünk, akkor valójában nem egyenes irányban haladunk, legalábbis nem abban az értelemben, ahogyan a geodetikus meghatározza a legrövidebb útvonalat a két város között.

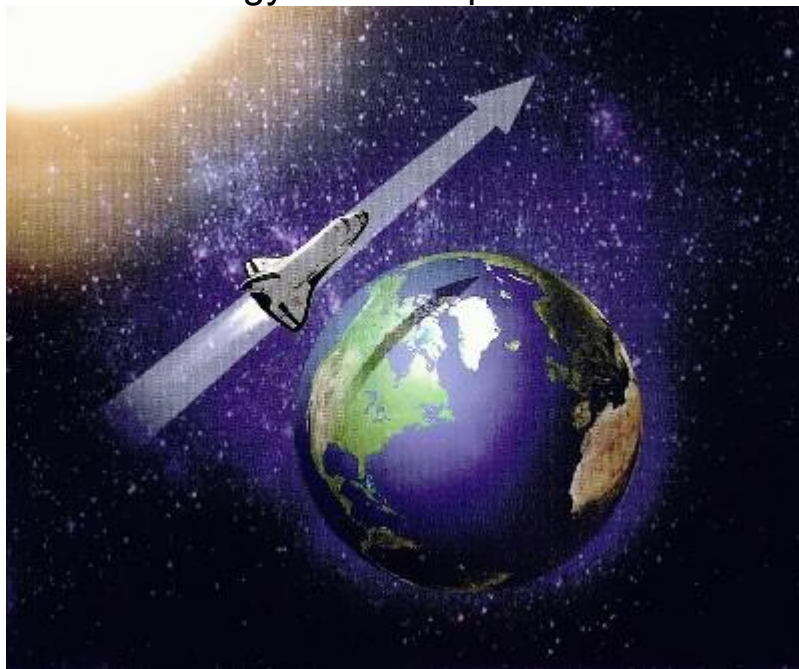


Távolságok a gömb alakú Földön.

A gömbön két pont között a legrövidebb útvonal a pontokon átmenő főkör mentén vezet. A főkör nem esik egybe a síkba kiterített térképre húzott egyenes vonallal.

Az általános relativitáselmélet szerint a testek mindig a négydimenziós téridő geodetikus vonalai mentén mozognak. Ha nincs jelen anyag, akkor a négydimenziós téridő geodetikus vonalai egybeesnek a háromdimenziós térben rajzolt egyenes vonalakkal. Anyag jelenlétében azonban a négydimenziós téridő eltorzul, ezért a háromdimenziós térben pontosan úgy görbül meg a testek pályája, mint ahogy a régi, Newton-féle elmélet magyarázata szerint a gravitációs erő hatására. Ahhoz hasonló ez, mint amikor egy dombos táj fölött szálló repülőgépet figyelünk. A repülőgép a háromdimenziós térben egyenes vonal mentén repül, ha azonban figyelmen kívül hagyjuk a harmadik dimenziót – a magasságot –, akkor azt tapasztaljuk, hogy a repülőgép árnyéka a dimbes-dombos, de kétdimenziós felületen görbe vonal mentén mozog. Vagy képzeljünk el egy űrhajót, amelyik egyenes vonal mentén repül a térben, miközben pontosan az Északi-sark fölött halad el. Vetítsük le a pályáját a Föld kétdimenziós felszínére, ekkor azt látjuk, hogy az

űrhajó pályája félkör alakú lesz, az északi félgömb egy hosszúsági körét követi. Bár a jelenséget nehéz ábrázolni, a Nap tömege éppen annyira görbíti meg a téridőt, hogy bár a Föld a négydimenziós téridőben egyenes vonal mentén mozog, ennek a pályának a háromdimenziós vetülete egy csaknem pontosan kör alakú pálya.

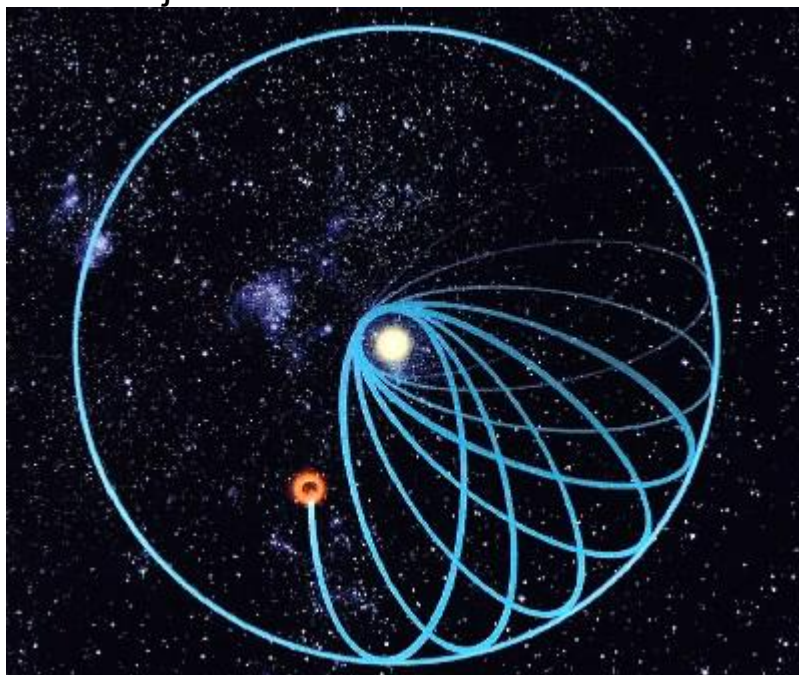


Az űrhajó útjának árnyéka.

Ha az egyenes vonalban repülő űrhajó pályáját levetítjük a gömb kétdimenziós felületére, akkor a pálya vetülete görbült lesz.

Bár a két elmélet két merőben különböző módszerrel származtatja a bolygók pályáját, mégis az általános relativitáselmélet szerinti pálya csaknem pontosan ugyanolyan alakúnak adódik, mint a Newton gravitációelmélete alapján számított. A legnagyobb eltérés a két elmélet eredménye között a Merkúr bolygó esetében mutatkozik, mert ez a Naphoz legközelebbi bolygó, ezért erre hat a legerősebben a gravitáció, amellet pályája meglehetősen elnyúlt. Az általános relativitáselmélet szerint a pályae ellipszis nagytengelyének nagyon lassan el kell fordulnia a Nap körül, jóllehet az elfordulás mértéke körülbelül tízezer évenként egy fok. Bár az effektus nagyon kicsi, mégis már jóval 1915 előtt észrevették (lásd a 3. fejezetben). Az eltérés magyarázata volt az első bizonyíték Einstein általános relativitáselmélete mellett. A közelmúltban más bolygók esetében is sikerült radarcsillagászati^{*} mérésekkel kimutatni az ellipszis alakú pálya nagytengelyének (még a Merkúrénál is sokkal lassúbb)

elfordulását. Megállapították, hogy a Newton-féle elmélettől való eltérés minden esetben pontosan megegyezett az általános relativitáselmélet előrejelzésével.



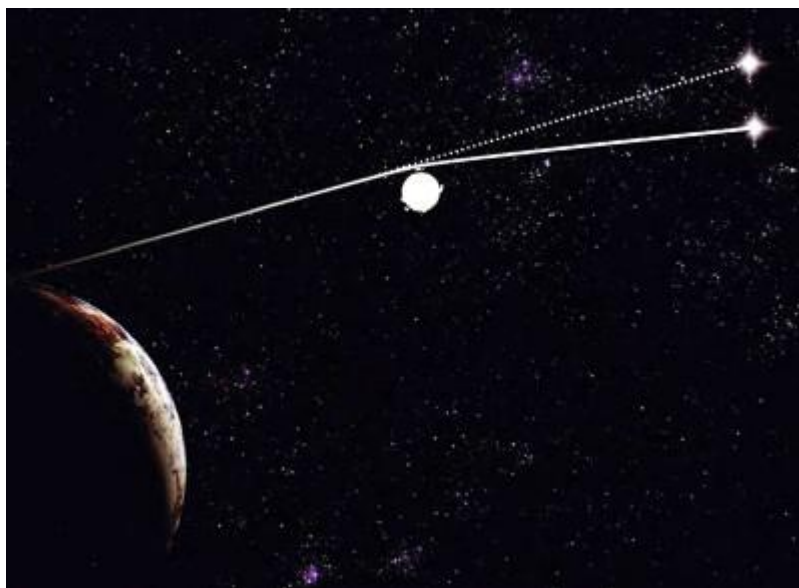
A Merkúr pályájának precessziója

Miközben a Merkúr a Nap körül kering, ellipszis alakú pályájának nagytengelye lassan elfordul. A tengely nagyjából 23000 év alatt tesz meg egy teljes kört. A jelenség pontos magyarázatát Einstein általános relativitáselmélete adta meg.

A fénysugaraknak ugyancsak geodetikus vonalak mentén kell a négydimenziós téridőben mozogniuk. A tér görbült volta ebben az esetben is azt jelenti, hogy a fénysugár a háromdimenziós térben már nem egyenes vonal mentén látszik haladni, vagyis az általános relativitáselmélet szerint a gravitációs tér elgörbíti a fénysugár útját. Az elmélet tehát feltételezi, hogy a Nap mellett elhaladó fénysugár a Nap tömege következtében kis mértékben befelé térül el. Ez azt jelenti, hogy a távoli csillag fénye, amelyik véletlenül éppen a napkorong közelében halad el, egy kicsiny szöggel eltérül, vagyis a földi megfigyelő valódi helyétől eltérő pozícióban észleli a csillagot. Természetesen, ha a csillag fénye mindig a Nap mellett menne el, akkor soha nem vehetnénk észre a jelenséget, hiszen nem tudnánk eldönteni, hogy a csillag fénye valóban eltérült-e, vagy pedig a csillag valóban ott van, ahol látjuk. A Föld azonban kering a Nap körül, ezért mindig más csillagok kerülnek látszólag a Nap mögé és

mellé, így mindig más csillagok fénye térül el. Ennek következtében ezeknek a csillagoknak a más csillagokhoz képest mért pozíciója átmenetileg megváltozik.

Közönséges körülmények között nagyon nehéz megfigyelni ezt a jelenséget, mert a Nap erős fénye miatt lehetetlen észrevenni a közelében látszó csillagokat. Napfogyatkozás során azonban a Hold eltakarja a Nap fényét, így mégiscsak megpillanthatók az éppen akkor a közelében látszó csillagok. Einstein fényeltérítésre vonatkozó előrejelzését 1915-ben még nem lehetett ellenőrizni, mert tartott az első világháború. Erre egészen 1919-ig kellett várni, amikor egy brit expedíció, amelyik Nyugat-Afrika partvidékéről figyelte meg az akkori napfogyatkozást, kimutatta, hogy a Nap mellett valóban eltérül a csillagok fénye, ráadásul éppen az általános relativitáselmélet által jelzett mértékben. Annak idején a két ország közötti nagyszabású megbékélés jeleként üdvözölték, hogy közvetlenül a háború befejezése után egy brit expedíció igazolta egy német tudós elméletét. A sors iróniája, hogy az expedíció által készített felvételek későbbi, alaposabb átvizsgálása kor kiderült, hogy a mérési hiba ugyanakkora volt, mint a megmérni szándékozott hatás. Az általános relativitáselméletet igazoló mérési eredményük tehát a pusztá szerencsének volt köszönhető – vagy talán annak, hogy tudták, milyen eredményt szerettek volna kapni – ami nem ritka eset a tudomány történetében. A fénysugár eltérülését azonban azóta számos további megfigyeléssel pontosan igazolták.



A fénysugár eltérülése a Nap mellett.

Amikor a Nap csaknem pontosan a Föld és egy távoli csillag közé kerül, elgörbíti a csillag fényét, ezért a csillag látszólag odébb tolódik az égen.

Az általános relativitáselmélet másik előrejelzése értelmében az időnek lassabban kell múlnia nagy tömegű testek, például a Föld közelében. Einstein erre már 1907-ben rájött, vagyis öt évvel hamarabb, mint arra, hogy a gravitáció megváltoztatja a tér szerkezetét, és nyolc évvel előbb, mint ahogy befejezte volna a teljes elmélet kidolgozását. A jelenséget az ekvivalenciaelvből vezette le, amely kulcsfontosságú szerepet játszik az általános relativitáselméletben.

Emlékezzünk vissza arra, hogy a speciális relativitáselmélet alapvető posztulátuma szerint a természettudományok törvényeinek minden szabadon mozgó megfigyelő számára ugyanolyanoknak kell lenniük, függetlenül attól, milyen sebességgel mozognak. Némi leegyszerűsítéssel elmondhatjuk, hogy az ekvivalenciaelv ezt azokra a megfigyelőkre is kiterjeszti, akik nem szabadon mozognak, hanem gravitációs mező hatása alatt állnak. Ha precízen akarjuk megfogalmazni az elvet, akkor sok technikai részletre is ki kell térnünk, mint például arra, hogy a gravitációs tér nem homogén, így az elvet egymást átfedő, kis tartományok sorozatára kell alkalmazni, ezekkel a részletekkel azonban itt és most nem foglalkozunk. Céljainknak tökéletesen megfelel, ha az elvet a következőképpen

fogalmazzuk meg: a tér elegendően kicsiny tartományaiban lehetetlen eldönteni, hogy nyugalomban vagyunk valamilyen gravitációs mezőben, vagy pedig egyenletesen gyorsulunk az üres térben.

Képzeljük el, hogy az üres térben lebegő lift belsejében tartózkodunk. Nem hat a gravitáció, tehát nincs értelme a „felfelé” és a „lefelé” fogalmának. Szabadon lebegünk. Ekkor a lift állandó gyorsulással elindul. Hirtelen érezni kezdjük a súlyunkat. Ez azt jelenti, hogy a lift egyik oldala irányába ható húzóerőt érzünk, vagyis a liftnek azt az oldalát kezdjük a kabin padlójaként érzékelni. Ha most a kinyújtott kezünkben tartott almát elengedjük, az leesik a kabin padlójára. Valójában most, amikor a kabin gyorsul, minden pontosan úgy játszódik le benne, mintha a lift nem mozogna, hanem egy homogén gravitációs térben állna.

Einstein rájött, hogy éppúgy, ahogy a mozgó vonat belsejében sem tudjuk eldönteni, hogy a vonat egyenletes sebességgel mozog, vagy áll, ugyanúgy a lift belsejében sem tudjuk eldönteni, hogy a kabin egyenletesen gyorsul, vagy homogén gravitációs térben áll. Ez a megállapítás az Einstein-féle ekvivalenciaelv.

Az ekvivalenciaelv és a fenti példa azonban csak akkor igaz, ha a tehetetlen tömeg (vagyis a Newton második törvényében szereplő tömeg, amely megszabja, miként reagálnak a testek a rájuk ható erőre) és a súlyos tömeg (a Newton gravitációs törvényében szereplő tömeg, amely megadja, milyen nagyságú súlyerőt érzünk) nem különbözik egymástól (lásd a 4. fejezetben). Azért van ez így, mert ha a kétféle tömeg ugyanakkora, akkor a testek ugyanolyan gyorsulással esnek a gravitációs térben, függetlenül attól, mekkora a tömegük. Ha ez az ekvivalencia nem lenne igaz, akkor a gravitáció hatására egyes testek gyorsabban esnének másoknál, ami azt jelentené, hogy mégiscsak meg tudnánk különböztetni a gravitációt az egyenletes gyorsulástól, mely utóbbi esetben minden test azonos gyorsulással esne. Einstein tehát felhasználta a tehetetlen és a súlyos tömeg azonosságát saját ekvivalenciaelvének levezetéséhez, illetve ezen keresztül az általános relativitáselmélet felállításához. A tiszta logika eme diadala egyedülálló az emberi gondolkodás történetében.

Most, hogy megismertük az ekvivalenciaelvet, elkezdhetjük követni

Einstein logikáját, és elvégezhetünk egy másik gondolat kísérletet, amely megvilágítja, miért kell a gravitációnak hatással lennie az idő múlására. Képzeljünk el egy űrrakétát a világűrben. Az egyszerűség kedvéért feltételezzük, hogy a rakéta olyan hosszú, hogy a fénysugár pontosan egy másodperc alatt jut el a plafonjától (orrától) a padlójáig (hátlójáig). Végül feltételezzük, hogy a rakéta orrában és a hátlójában egy-egy megfigyelő ül, kezükben azonos, másodpercenként egy jelet kiadó órákkal.

Tegyük fel, hogy a rakéta orrában ülő megfigyelő megvárja, amíg a saját órája kiadja a következő jelet, és abban a pillanatban elindít egy fényjelet a rakéta vége felé. Az óra következő jelénél a plafonon ülő megfigyelő még egy fényjelet küld lefelé. Ebben az elrendezésben minden egyes fényjel egy másodperc alatt ér el a rakéta végébe, ahol azt az ott ülő megfigyelő felfogja. A plafonon ülő megfigyelő tehát egy másodperc időkülönbséggel két jelet indított útnak, amelyeket a padlón ülő társa egy másodperc időkülönbséggel fogott fel.

Miként változna meg a fenti eseménysor, ha a rakéta nem a szabad világűrben lebegne, hanem a Földön állna, és ennek megfelelően hatna rá a földi nehézkedés? Newton elmélete értelmében a gravitáció semmilyen hatással sem lenne a helyzetre. Ha a plafonon ülő megfigyelő egy másodpercenként küldi ki a fényjeleket, akkor azok egy másodpercenként érkeznek a másik megfigyelőhöz. Az ekvivalenciaelv alapján azonban nem ugyanerre a következtetésre jutunk. Legkönnyebben úgy érthetjük meg, mi történik, illetve mit jósol az ekvivalenciaelv, ha először nem a gravitáció, hanem az egyenletes gyorsulás rendszerre gyakorolt hatását vizsgáljuk meg. E példán keresztül azt akarjuk bemutatni, miként használta Einstein az ekvivalenciaelvet új gravitációelmélete létrehozásához.

Tehát feltételezzük, hogy a rakéta gyorsul. (Kis gyorsulásra gondoljunk, így nem fogjuk megközelíteni a fénysebességet!) Minthogy a rakéta felfelé emelkedik, az első jelnek most kisebb távolságot kell megtennie, mint az álló rakétában, ezért egy másodpercnél rövidebb idő alatt érkezik meg a rakéta végébe. Ha a rakéta állandó sebességgel mozogna, akkor a második jel pontosan ugyanannyival hamarabb érne célba, mint az első, vagyis a két jel beérkezése közötti időkülönbség továbbra is egy másodperc lenne.

A gyorsulás következtében azonban a második jel kibocsátásakor a rakéta már gyorsabban mozog, mint egy másodperccel korábban, ezért a második jelnek az elsőnél kisebb utat kell megtennie a rakéta végéig, amihez természetesen rövidebb időre van szükség. Következésképpen a padlón ülő megfigyelő egy másodpercnél rövidebbnek fogja mérni a két fényjel beérkezése közötti időtartamot, ellentétben a plafonon elhelyezkedő megfigyelővel, aki váltig állítja, hogy pontosan egy másodperc telt el a két jel kibocsátása között.

Mindez természetesen nem túlságosan meglepő, hiszen egy egyszerű gondolatmenettel beláttuk, hogy a gyorsuló rakétában valóban ennek kell történnie. De akkor emlékezzünk csak vissza: az előbb megismert ekvivalenciaelv értelmében ennek kell történnie akkor is, ha az űrhajó nyugalomban van egy égitest gravitációs terében. Tehát, ez azt jelenti hogy ha a rakéta nem gyorsul, hanem mondjuk a Föld felszínén, az indítóállványon áll, és a plafonon ülő megfigyelő ekkor küldözgeti ki (saját órája szerint) egy másodpercenként a fényjeleket, az alsó megfigyelőnek ebben az esetben is (az ő órája szerint) egy másodpercnél rövidebb időközönként kell a bejövő fényjeleket észlelnie. Ez viszont már tényleg meghökkentő!

Most persze Önök joggal tehetik fel a kérdést, hogy ez vajon azt jelenti-e, hogy a gravitáció megváltoztatja az idő múlását, vagy egyszerűen csak azt, hogy a gravitáció elrontja az órákat. Tegyük fel, hogy az alsó megfigyelő felmászik a rakéta orrába, ahol társával összehasonlítják az óráikat. Az órák teljesen egyformák, ezért meglehetősen biztosak lehetünk abban, hogy a megfigyelők egyet fognak érteni abban, milyen hosszú egy másodperc. Semmi sem romlott el az alsó megfigyelő órájában, csak az éppen az idő helyi múlását méri, mindig ott, ahol éppen van az óra. A speciális relativitáselmélet szerint az egymáshoz képest mozgó megfigyelők órái járnak különbözőképpen, míg az általános relativitáselmélet szerint a különböző erősségű gravitációs térben tartózkodó megfigyelők számára is eltérő tempóban múlik az idő. Az általános relativitáselmélet értelmében az alsó megfigyelő azért mért rövidebb időt a fényjelek beérkezése között, mert a Föld felszíne közelében lassabban múlik az idő. Minél erősebb a gravitációs tér, annál határozottabban jelentkezik ez az effektus. Newton mozgástörvényei

leszámoltak az abszolút hely fogalmával. Most pedig azt láttuk, miként szabadult meg az általános relativitáselmélet az abszolút időtől.

Ezt az előrejelzést 1962-ben sikerült kísérletileg ellenőrizni. A kísérletet egy víztorony tetején és alján elhelyezett, két, nagyon pontos órával végezték. A torony aljában lévő, azaz a Föld középpontjához közelebbi óra járását valóban lassabbnak találták, pontos egyezésben az általános relativitáselmélettel. A hatás roppant kicsi – egy a Nap felszínén elhelyezett óra csupán egyetlen percet késik évente a Föld felszínén működő, vele egyébként azonos órához képest. Ma már, a műholdas navigációs rendszereknél a jelenség a gyakorlatban is fontos szerephez jut, hiszen a magasan a Föld felszíne fölött keringő órák számára a földiektől eltérő tempóban múlik az idő. Ha figyelmen kívül hagyjuk az általános relativitáselmélet előrejelzéseit, akkor pozíciónk kiszámításakor akár több kilométeres hibát is véthetünk!

Ezek az idő múlásában bekövetkező változások biológiai óráinkat is befolyásolják. Képzeljünk most el egy ikerpárt. Tegyük fel, hogy az egyik testvér egy hegytetőn él, míg a másik a tengerszinten. Az előbbi gyorsabban fog öregedni, mint a testvére (mert a hegytetőn valamivel gyengébb, a hegy lábánál pedig kissé erősebb a gravitációs tér, és az erősebb térben lassabban múlik az idő – fordító megjegyzése). Ezért amikor újra találkoznak, már nem lesznek egyidősek. Ebben az esetben persze a koruk közötti különbség nagyon kicsi lesz, ám ez nagyobb lenne abban az esetben, ha az egyik testvér hosszú űrutazásra indulna egy, a fényéhez közeli sebességgel száguldó űrhajóval. Amikor visszatérne a Földre, sokkal fiatalabb lenne Földön maradt testvérénél. A jelenség ikerparadoxon néven került be a fizikakönyvekbe, bár paradoxonról csak akkor beszélhetünk, ha gondolkodásunkban az abszolút idő fogalma rögzült. A relativitáselméletben viszont nem létezik az abszolút idő, hanem mindenki számára „testre szabott” tempóban múlik az idő, attól függően, hogy hol tartózkodik, és milyen sebességgel mozog.

1915 előtt a teret és az időt stabilan felépített színpadnak hittük, amelyben lejátszódnak az események, de amelyet a benne történtek nem befolyásolnak. Ez még a speciális relativitáselmélet esetében is

igaz volt. A testek mozogtak, az erők vonzották vagy taszították őket, de a tér és az idő változatlan maradt. Magától értetődő volt arra gondolni, hogy a tér és az idő örökké létezik. Az általános relativitáselmélet esetében azonban egészen más a helyzet. A tér és az idő immár dinamikus mennyiségek: amikor egy test mozog vagy valamilyen erő hat, akkor az hatással van a tér és az idő görbületére – és megfordítva, a téridő szerkezete befolyást gyakorol a testek mozgására, és arra, miként hatnak az erők. A tér és az idő nemcsak hatást gyakorol a Világegyetem történéseire, hanem minden, ami a Világegyetemben történik, hatással van rájuk. Éppúgy, ahogy nem beszélhetünk a Világegyetemben történő eseményekről a tér és az idő fogalmának használata nélkül, hasonlóképpen az általános relativitáselméletben értelmetlen a Világegyetem határain kívül lévő térről és az ott múlt időről beszélni. Az 1915-öt követő évtizedekben a térnek és az időnek ez az új felfogása forradalmasította egész világképünket. Amint rövidesen látni fogjuk, a lényegében a múltban és a jövőben is örökké létező és változatlan Világegyetem fogalma helyére egy dinamikusan változó, táguló Világegyetem képe lépett. Ráadásul úgy tűnt, hogy ez a tágulás meghatározott idővel ezelőtt vette kezdetét, és a jövő egy határozott pillanatában véget érhet.

HETEDIK FEJEZET

A táguló Világegyetem

Ha felpillantunk a csillagos égre egy derült, holdtalan éjszakán, akkor a Vénusz, a Mars, a Jupiter és a Szaturnusz bolygókat látjuk a legfényesebb égitestként ragyogni. Emellett számtalan csillagot is látunk, amelyek a Napunkhoz hasonlóak, de sokkal messzebb vannak tőlünk. Ezen úgynevezett állócsillagok közül azonban egyesek a közelükben látszó többi csillaghoz képest parányi mértékben elmozdulnak, a Föld Nap körüli keringése következtében. Valójában tehát az állócsillagok korántsem állnak! A jelenség azért lép fel, mert ezek a csillagok viszonylag közel vannak hozzánk. Ahogy a Föld kering a Nap körül, mindig más irányban látjuk ezeket a csillagokat a távolabbiak alkotta égi háttér előtt. Ugyanazt tapasztaljuk tehát, mint amikor az országúton autózva azt látjuk, hogy a közeli fák elmozdulnak a látóhatár közelében lévő, távoli

objektumokhoz képest. Minél közelebb vannak a fák, annál nagyobb a látszólagos elmozdulásuk. A relatív helyzet megváltozását parallaxisnak nevezzük (lásd a következő ábrát). A csillagászok számára ez a szerencsés körülmény teszi lehetővé, hogy közvetlenül meg tudják mérni, milyen messze vannak a közeli csillagok.

Amint az 1. fejezetben már említettük, a hozzánk legközelebbi csillag, a Proxima Centauri távolsága körülbelül négy fényév, vagyis kb. 40 millió millió kilométer. A szabad szemmel látható csillagok legtöbbje legfeljebb néhány száz fényévre van tőlünk. Napunk távolsága ezzel szemben mindössze nyolc fényperc! A szabad szemmel látható csillagok mindenfelé előfordulnak az égbolton, de jó részük a Tejútnak nevezett sávba koncentrálódik. Néhány csillagász már 1750-ben arra gondolt, hogy a Tejút látványát meg lehetne magyarázni, ha feltételeznénk, hogy a látható csillagok többsége egy korongszerű alakzatba tömörül – ez utóbbit nevezzük ma spirálgalaxisnak. Alig néhány évtized elteltével Sir William Herschel roppant számú csillag katalógizálása árán igazolta ezt a feltételezést. Herschel feltevését mégis csak a XX. század elején fogadták el széles körben. Ma már tudjuk, hogy galaxisunk, a Tejútrendszer mintegy százezer fényév átmérőjű, és lassan forog: a spirálkarjaiban található csillagok néhány százmillió évenként kerülnek meg egyszer a középpontját. Napunk csak egyike a Tejútrendszer átlagos, sárgás fényű csillagainak, az egyik spirálkar belső pereme közelében. Nyilvánvalóan hosszú utat tettünk meg Arisztotelész és Ptolemaiosz kora óta, amikor még a Földet hitték az egész Világegyetem középpontjának.



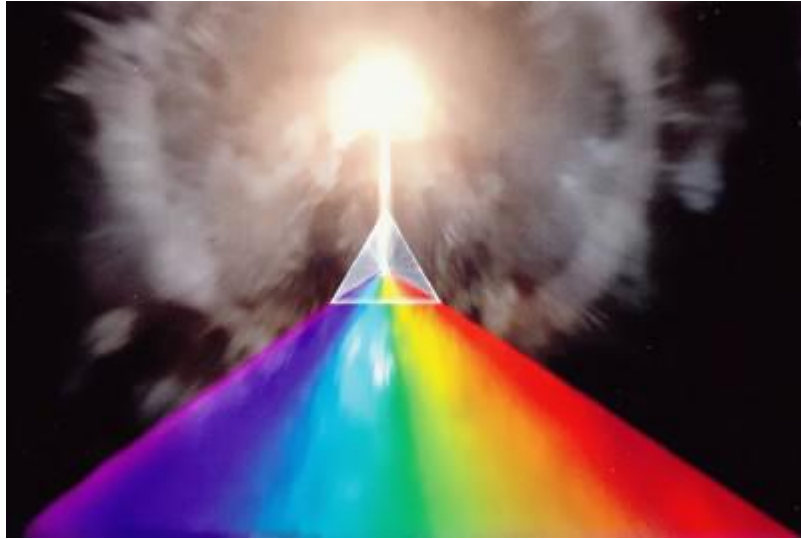
Parallax.

Akár egy országúton autózunk, akár a világűrben repülünk, a közelebbi és a távolabbi tárgyak egymáshoz viszonyított helyzete folyamatosan változik. E változás mértéke felhasználható az objektumok relatív távolságának megállapítására.

A Világegyetemről alkotott mai képünk gyökerei 1924-ig nyúlnak vissza, amikor Edwin Hubble amerikai csillagász kimutatta, hogy nem a Tejútrendszer az egyetlen galaxis. Megállapította, hogy további galaxisok is léteznek, amelyeket a világűr hatalmas, üres tartományai választanak el egymástól. Ennek bizonyításához Hubble-nak meg kellett határozni más galaxisok tőlünk mért távolságát. Ám ezek a galaxisok roppant messze vannak, ezért a közeli csillagokkal ellentétben égbolton elfoglalt helyük nem változik. Hubble tehát nem használhatta a parallaxismódszert a galaxisok távolságának megmérésére, ezért közvetett úton kellett próbálkoznia. Nyilvánvaló módszernek tűnik a csillagok távolságának megállapítása fényességük alapján. Ám a csillagok látszó fényessége nemcsak a távolságuktól függ, hanem attól is, mennyi fényt sugároznak ki valójában az egyes csillagok (luminozitásuktól). Ha egy halványan pislákoló csillag elegendően

közel van, akkor fényesebbnek látszhat, mint egy távoli galaxis legragyogóbb csillaga. Ha tehát a csillagok látszó fényessége alapján akarjuk kiszámítani a galaxisok távolságát, akkor ismernünk kell a csillagok luminozitását.

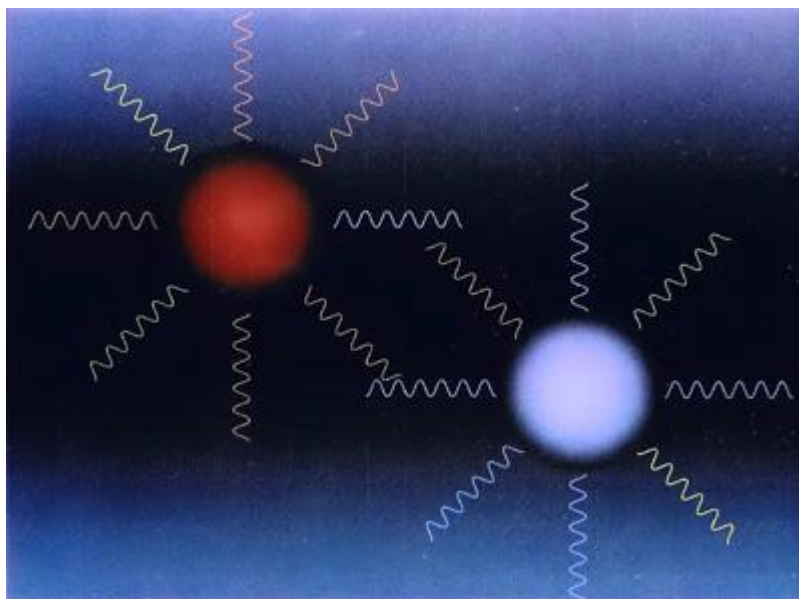
A közeli csillagok luminozitása látszó fényességükből kiszámítható, mert parallaxisuknak köszönhetően ismerjük a távolságukat. Hubble észrevette, hogy ezek a közeli csillagok az általuk kisugárzott fény sajátosságai alapján bizonyos osztályokba sorolhatók. Az ugyanazon típusba tartozó csillagok luminozitása is azonos. Úgy okoskodott, hogy ha ugyanilyen típusú csillagokat sikerülne találnunk a távoli galaxisokban, akkor feltételezhetnénk, hogy azok luminozitása ugyanakkora, mint a közelié. Ennek ismeretében ki tudjuk számítani a galaxis távolságát. Ha ezt a műveletet egy kiszemelt galaxisban lévő sok csillag esetében elvégezzük, és mindannyiszor ugyanazt a távolságot kapjuk eredményül, akkor meglehetősen biztosak lehetünk becslésünk helyességében. Ezzel a módszerrel Hubble kilenc különböző galaxis távolságát számította ki. Ma már tudjuk, hogy szabad szemmel csak a csillagok csekély hányada látható. Mintegy ötezer csillagot láthatunk így, ez csak kb. 0,0001 százaléka a mi galaxisunkban található csillagoknak. A Tejútrendszer pedig csupán egyike annak a több mint százmilliárd galaxisnak, amelyet távcsövekkel meg lehet figyelni – és ezek mindegyike körülbelül százmilliárd csillagot tartalmaz. Ha minden csillag csak akkora lenne, mint egy sószemcse, akkor a szabad szemmel látható csillagok elférnének egy kávéskanálban, a Világegyetem összes csillaga viszont egy több mint 12 kilométer átmérőjű gömbben férne csak el.



A csillagok színeképe^{}.*

A csillag fényét alkotó színeket elemezve meg tudjuk határozni a csillag hőmérsékletét és légkötének összetételét.

A csillagok olyan messze vannak, hogy csak tűszúrásnyi fénypontoknak látszanak. Sem méretüket, sem alakjukat nem tudjuk megállapítani. Hubble azonban észrevette, hogy különféle típusú csillagok léteznek, amelyeket színük alapján különböztethetünk meg. Már Newton felfedezte, hogy ha a Nap fényét háromszög alapú üveghasábon, úgynevezett prizmán engedjük át, akkor a fény a szivárvány színeire bomlik. Az adott fényforrás által kibocsátott fényben az egyes színek viszonylagos fényességét a fényforrás színeképének (spektrumának) nevezzük. Ha távcsövünket egy csillagra vagy galaxisra irányítjuk, akkor elő tudjuk állítani az onnan érkező fény színeképét.



Feketetest-sugárzás.

Minden test – nem csak a csillagok – sugárzást bocsát ki, mikroszkopikus alkotórészei folyamatos hőmozgása következtében.

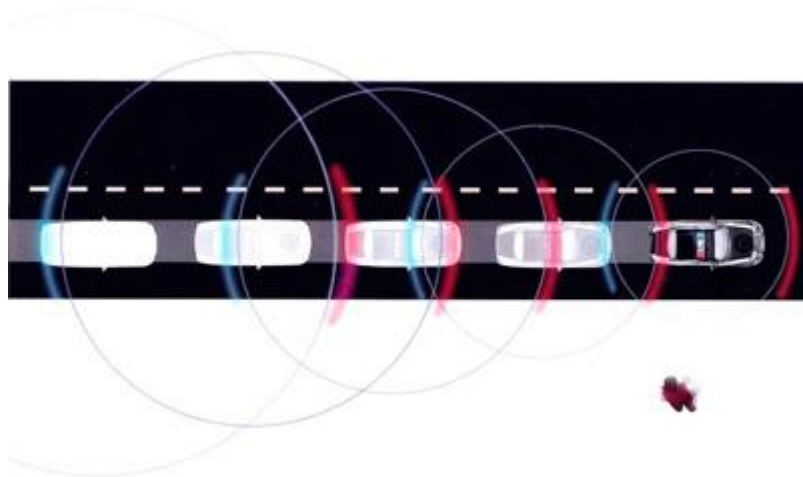
A kibocsátott sugárzáson belül a frekvenciák eloszlása a sugárzó test hőmérsékletére jellemző.*

Az egyik fizikai tulajdonság, amiről a színek árulkodik, a kibocsátó forrás hőmérséklete. Gustav Kirchhoff német fizikus 1860-ban felismerte, hogy minden anyagi test fényt vagy más sugárzást bocsát ki, ha felhevítjük. Emiatt világít az izzó szén éppúgy, mint a csillagok. Az izzó testek atomjaik hőmozgása miatt bocsátják ki a sugárzást. Ezt feketetest-sugárzásnak nevezzük (annak ellenére, hogy az izzó testek soha nem feketék). A feketetestek sugárzásának színeképe mással összetéveszthetetlen: jellegzetes alakja a sugárzó test hőmérsékletétől függően változik. Ha alaposan megvizsgáljuk, a csillagok fénye további érdekességeket is elárul. Az látjuk például, hogy a csillagok színekéből bizonyos, jellegzetes színek hiányoznak, de hogy pontosan melyek, az csillagról csillagra változik. Mivel tudjuk, hogy minden egyes kémiai elem a rá jellemző színű fénysugarakat nyeli el, ezeket az adatokat a csillagok színekéből hiányzó színekkel összehasonlítva pontosan megállapítható, milyen kémiai elemek alkotják a csillag légkörét. Az 1920-as években, amikor a csillagászok elkezdték a távoli galaxisokban lévő csillagok színekét is vizsgálni, meglepő felfedezést tettek. A hiányzó vonalaknak ugyanazt a jellegzetes

mintázatát látták, mint a Tejútrendszer csillagainak színekében, azonban az egész mintázat eltolódott a színek vörös vége felé.

A fizikusok jól ismerik a szín, vagyis a frekvencia eltolódásának a jelenségét, az úgynevezett Doppler-effektust. A hangok világában mindenki észlelte már a jelenséget. Figyeljük meg, amikor egy autó elmegy mellettünk az országúton. Amikor közeledik felénk, a motorjának – vagy a dudájának – a hangja magasabb, mint miután elment mellettünk, és már távolodik. A motor vagy a kürt hangja hullám, vagyis hullámhegyek és hullámvölgyek egymásutánja. Amikor a kocsí felénk robog, egyre közelebb kerül hozzánk, ahogy egyik hullámhegyet a másik után kibocsátja. Ezért a hullámhegyek közötti távolság – vagyis a hang hullámhossza – kisebb lesz annál, mintha az autó állna. Minél rövidebb a hullámhossz, annál több fluktuáció éri el másodpercenként a fülünket, vagyis annál magasabbnak halljuk a hangot (annál nagyobb a frekvenciája). Megfordítva, ha az autó távolodik tőlünk, a hullámhossz nagyobb lesz, és a fülünket elérő hullámokat kisebb frekvenciájúaknak érzékeljük, azaz mélyebbnek halljuk. Minél gyorsabban megy az autó, annál nagyobb az effektus, ezért a Doppler-jelenséget a sebesség mérésére is felhasználhatjuk. A fény és a rádióhullámok hasonlóan viselkednek.

A látható fény hullámhossza nagyon kicsi, a milliméter négyszáz és nyolcszáz milliommód része közé esik (400-800 nanométer). A különböző hullámhosszú fénysugarakat az emberi szem különböző színűként érzékeli, a legnagyobb hullámhosszút vörösnek, a legrövidebbet kéknek látjuk. Képzeljünk most el egy tőlünk állandó távolságra lévő fényforrást, például egy csillagot, amelyik állandó hullámhosszú fénysugarakat bocsát ki. A szemünkbe érkező fény hullámhossza pontosan ugyanakkora lesz, mint amilyent a csillag kisugárzott. Feltételezzük, hogy a csillag elkezd tőlünk távolodni. Akárcsak a hanghullámok esetében, ez azt jelenti, hogy a hullámok megnyúlnak, a színek eltolódnak a spektrum vörös vége felé.



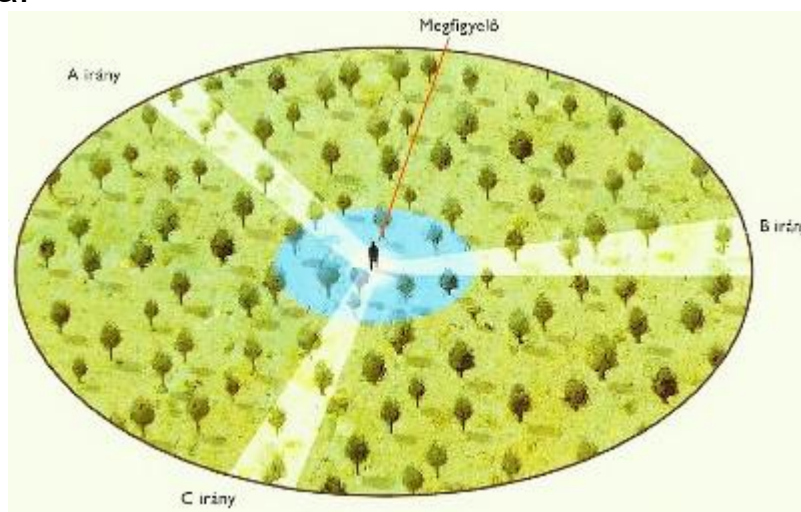
A Doppler-jelenség.

Ha egy hullámforrás közeledik a megfigyelő felé, az általa kibocsátott hullámok rövidebb hullámhosszúnak látszanak. Ha viszont a forrás távolodik, akkor a hullámhossz nagyobbak tűnik. Ezt nevezzük Doppler-jelenségnek.

Miután Hubble bebizonyította a Tejútrendszeren kívüli galaxisok létezését, néhány éven keresztül távolságaik katalogizálásával és színekük megfigyelésével foglalkozott. Abban az időben a legtöbben úgy gondolták, hogy a galaxisok véletlenszerű mozgást végeznek, ezért Hubble arra számított, hogy ugyanannyi kék felé eltolódott színekpet fog találni, mint ahány vörös felé eltolódottat. Legnagyobb meglepetésére azonban azt tapasztalta, hogy a legtöbb galaxis színeke a vörös felé tolódik el, vagyis néhány kivételtől eltekintve valamennyi galaxis távolodik tőlünk! Még meglepőbb volt az a felismerés, amelyet Hubble 1929-ben hozott nyilvánosságra: még a galaxisok vöröseltolódása* sem véletlenszerű, hanem egyenesen arányos a galaxisok tőlünk mért távolságával. Más szavakkal kifejezve ez azt jelenti, hogy minél messzebb van egy galaxis, annál gyorsabban távolodik! Ebből következően a Világegyetem nem lehet statikus, vagyis változatlan méretű, amint azt korábban mindenki feltételezte. Valójában tehát a Világegyetem tágul: a különböző galaxisok közötti távolság folyamatosan nő. Ha egy hullámforrás közeledik a megfigyelő felé, az általa kibocsátott hullámok rövidebb hullámhosszúnak látszanak. Ha viszont a forrás távolodik, akkor a hullámhossz nagyobbak tűnik. Ezt nevezzük Doppler-jelenségnek.

A Világegyetem tágulásának felfedezése a XX. század egyik legnagyobb szellemi forradalmát jelentette. Utólag persze akár el is csodálkozhatunk rajta, miért nem gondolt erre valaki már korábban is. Newton és kortársai rájöhettek volna, hogy a statikus Világegyetem instabil lenne, mert nincs olyan taszítóerő, amely egyensúlyt tudna tartani a csillagokat és a galaxisokat egymás felé vonzó gravitációval. Ezért a Világegyetem akkor sem maradhatott volna statikus, ha valamikor egy ideig esetleg az volt, mert a csillagok és a galaxisok kölcsönös gravitációs vonzása hatására hamarosan elkezdett volna összehúzódni. Valójában még ha a Világegyetem meglehetősen lassan tágult volna, a gravitációs erő előbb-utóbb akkor is megállította volna a tágulást, és a mindenség elkezdett volna összehúzódni. Ha azonban a Világegyetem egy kritikus tempónál gyorsabban tágult volna, akkor a gravitáció soha nem lett volna elég erős a tágulás lefékezéséhez, így az örökké tartana. Ez kicsit hasonló ahhoz, amikor a Földről függőlegesen felfelé elindítunk egy rakétát. Ha a rakétának meglehetősen kicsi a sebessége, akkor egy idő után a gravitáció megállítja az emelkedését, és a rakéta visszapottyann a Földre. Ha viszont a rakéta sebessége meghalad egy kritikus értéket (11,2 km/másodpercet), akkor a gravitáció soha nem lesz elég erős a lefékezéséhez, így a rakéta örökké távolodni fog a Földtől. A Világegyetem ilyen viselkedése Newton gravitációelmélete alapján is megjósolható lett volna, bármikor a XIX. vagy akár a XVIII. században, sőt a XVII. század végén is. Ám a statikus Világegyetembe vetett hit olyan erős volt, hogy ez a kép egészen a XX. század elejéig fennmaradt. Einstein még 1915-ben, az általános relativitáselmélet megalkotásakor is olyannyira bizonyos volt abban, hogy a Világegyetem csakis statikus lehet, hogy elméletét ennek megfelelően módosította, és az egyenletekbe bevezette a kozmológiai állandónak^{*} nevezett, önkényesen kitalált tényezőt, csak azért, hogy megengedje a statikus megoldást. A kozmológiai állandó egy „antigravitáció” jellegű hatást vezetett be az egyenletekbe, ami más erővel ellentétben nem valamilyen meghatározott forrásból eredt, hanem valamiképpen beépült a téridő szövetébe. Az új erőhatás eredményeképpen a téridő eredendő sajátságává vált a tágulás képessége. A kozmológiai állandó beállításával Einstein

hangolni tudta a tágulás mértékét. Rájött, hogy az állandó értékének megfelelő megválasztásával ki tudja egyensúlyozni a Világegyetemet kitöltő anyag kölcsönös gravitációs vonzását, így statikus Világegyetemet kap eredményül. Később azonban elutasította a kozmológiai állandót, és az önkényes tényező bevezetését „élete legnagyobb tévedésé”-nek minősítette. Hamarosan látni fogjuk azonban, hogy Einsteinnek talán mégiscsak igaza lehetett, amikor bevezette a kozmológiai állandót. Einstein bizonyára azért lehetett csalódott, mert megengedte, hogy a statikus Világegyetembe vetett hite győzedelmeskedjék saját elméletének előrejelzése, a táguló Világegyetem fölött. Úgy tűnik, csak egyetlenegy ember vette komolyan az általános relativitáselmélet jóslatát. Miközben Einstein és fizikus kollégái azt keresgálták, hogy lehetne elkerülni az általános relativitáselmélet egyenleteinek nem statikus megoldásait, Alexander Friedmann orosz fizikus és matematikus elhatározta, hogy magyarázatot ad ezekre a megoldásokra.



Izotrop erdő.

Hiába helyezkednek el a fák egyenletesen az erdőben, a hozzánk közeli egy csoportban látszanak. Hasonló a helyzet a Világegyetemben is, közvetlen kozmikus környezetünkben az égitestek eloszlását nem egyenletesnek látjuk. Nagy távolságra nézve a látvány ugyanolyan, akármerre is tekintünk.

Friedmann két nagyon egyszerű feltételezéssel élt a Világegyetemre vonatkozóan, nevezetesen: a Világegyetem ugyanolyannak látszik, akármerre is nézünk, és ez akkor is így

lenne, ha bárhonnan máshonnan szemlélnénk a világot. Ebből a két feltevésből kiindulva Friedmann az általános relativitáselmélet egyenleteit megoldva bebizonyította, hogy nem számíthatunk statikus Világegyetemre. Valójában Friedmann már 1922-ben pontosan azt jósolta meg, amit Hubble később felfedezett.

Az a feltevés, mely szerint a Világegyetem minden irányban ugyanolyannak látszik, a valóságban nem teljesen pontosan igaz. Például, amint már említettük, Tejútrendszerünk csillagai a Tejútnak nevezett határozottan kirajzolódó sávba rendeződnek az égbolton. Ha viszont a távoli galaxisokat nézzük, akkor azokból minden irányban többé-kevésbé ugyanannyit látunk. Vagyis a Világegyetem nagyjából ugyanolyannak látszik minden irányban, feltéve, hogy a galaxisok közötti távolságokhoz képest nagy skálákon figyeljük, és a kis léptékű eltéréseket figyelmen kívül hagyjuk. Képzeljük el, hogy egy erdőben állunk, amelyben véletlenszerűen elrendeződve nőnek a fák. Az egyik irányban a hozzánk legközelebbi fát mondjuk egy méterre, más irányban három méterre látjuk. Megint más irányban talán tőlünk két méterre kisebb facsoportot veszünk észre. Egyáltalán nem úgy tűnik, mintha az erdő minden irányban ugyanolyan lenne, ha azonban egy egy kilométer sugarú körön belül az összes fát figyelembe vennénk, akkor az efféle különbségek kiegyenlítődnének, és az erdőt minden irányban ugyanolyannak találnánk.

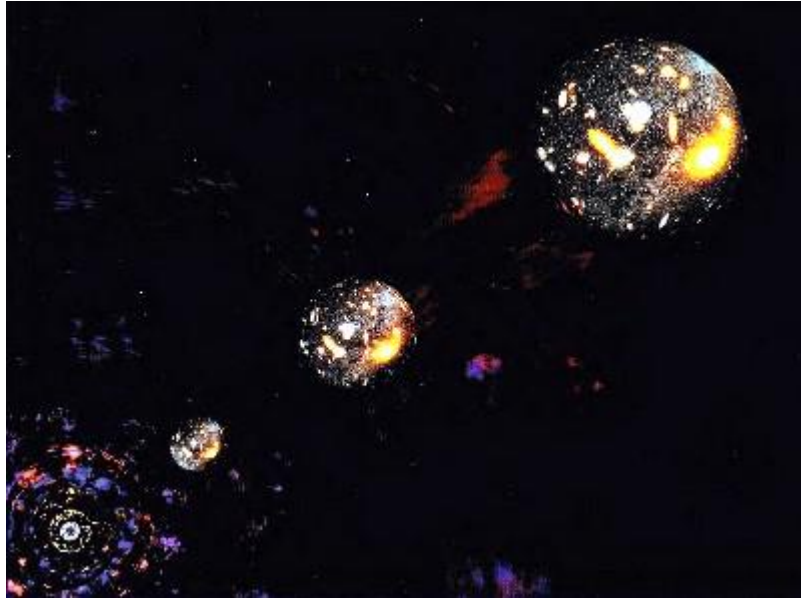
A csillagok egyenletes eloszlása hosszú időn keresztül megfelelő igazolást jelentett Friedmann feltételezéséhez – így azt elfogadták a valóságos Világegyetem durva közelítésének. Nemrégiben azonban egy szerencsés véletlennek köszönhetően újabb tényre derült fény, amely alátámasztja, hogy Friedmann feltételezése figyelemre méltó pontossággal igaz a valóságos Világegyetemre. Arno Penzias és Robert Wilson 1965-ben egy különösen érzékeny mikrohullámú detektort tesztelt. (Emlékezzünk vissza arra, hogy a mikrohullámok a fényhez hasonló elektromágneses hullámok, csak a hullámhosszuk nagyobb, 1 centiméter körüli.) Penziast és Wilsont elkeserítette, hogy a detektor több zajt fogott fel a kelleténél. Előbb madarak ürülékét találták az antennában, később más lehetséges hibaforrásokat is ellenőriztek, de mindet eredménytelenül. A zaj bizonyos szempontból nagyon furcsa természetű volt, mert éjjel és

nappal, minden évszakban állandó maradt, jöllehet a Föld eközben forgott a tengelye körül és keringett a Nap körül. Minthogy a Föld forgása és keringése következtében a detektor mindig a tér más irányába nézett, Penzias és Wilson arra a következtetésre jutott, hogy a rejtélyes sugárzás nemcsak a Naprendszer, hanem a Tejútrendszer határain kívülről érkezik. Úgy tűnt, mintha azonos erősséggel érkezne a tér minden irányából. (Ma már tudjuk, hogy bármerre nézünk is az égen, a sugárzás erőssége csak parányi mértékben ingadozik.) Penzias és Wilson akaratlanul rábukkant Friedmann első feltevésének egy meglepő példájára, amely azt igazolta, hogy a Világegyetem valóban ugyanolyan, bármerre nézünk is.

Mi lehet ennek a kozmikus háttérzajnak az eredete? Miközben Penzias és Wilson a detektorukkal bíbelődött, a Princeton Egyetem két fizikusa, Bob Dicke és Jim Peebles szintén a mikrohullámok iránt kezdett érdeklődni. George Gamownak azon az ötletén dolgoztak, amely szerint az ősi Világegyetemnek nagyon sűrűnek és forrónak kellett lennie, fehéren kellett izzania. Dicke és Peebles úgy okoskodott, hogy még ma is látnunk kellene az ősi Világegyetem izzásának a nyomát, hiszen a Világegyetem legtávolabbi részeiről jövő sugárzás is csak most ér el bennünket. A Világegyetem tágulása következtében azonban ennek a fénynek olyan nagymértékű vöröseltolódást kellett elszenvednie, hogy már nem fényként, hanem mikrohullámú sugárzásként* kellene észlelnünk. Dicke és Peebles éppen arra készült, hogy megpróbálja megfigyelni ezt a sugárzást, amikor Penzias és Wilson értesült felfedezésükről. Azonnal rájöttek, hogy ez éppen az a sugárzás, amit sikerült megfigyelniük. Felfedezésükért Penzias és Wilson 1978-ban megkapta a fizikai Nobel-díjat (ami minden bizonnyal kissé rosszulleshetett Dickének és Peeblesnek, Gamowról nem is beszélve).

Első pillanatban úgy tűnhet tehát, mintha mi lennénk a Világegyetem középpontjában, hiszen minden galaxis tőlünk látszik távolodni. Erre azonban más magyarázat is adható, nevezetesen: a Világegyetem bármely más galaxisból nézve is minden irányban ugyanolyannak látszik. Márpedig ez, mint láttuk, nem más, mint Friedmann második feltevése.

Friedmann világmodelljében mindegyik galaxis távolodik az összes többitől. Olyan ez, mintha egy léggömb felületére pöttyöket rajzolnánk, majd elkezdenénk egyenletes tempóban felfújni. Ahogy a léggömb tágul, bármely két pont közötti távolság folyamatosan növekszik, még sincs egyetlen olyan pötty sem, amelyet a tágulás középpontjának tekinthetnénk. Sőt, mivel a léggömb egyenletes sebességgel tágul, minél messzebb van egymástól két pont a felületén, annál gyorsabban távolodnak egymástól. Tegyük fel például, hogy a léggömb sugara egy másodperc alatt a kétszeresére nő. Két, egymástól korábban egy centiméterre lévő pont ezalatt két centiméterre távolodik egymástól (a léggömb felületén mérve), relatív sebességük tehát egy centiméter másodpercenként. Két, eredetileg tíz centiméterre lévő pont az egy másodperc elteltével húsz centiméterre kerül egymástól, így ezek relatív sebessége tíz centiméter másodpercenként. Ehhez hasonlóan, Friedmann modelljében is bármely két galaxis távolodási sebessége egyenesen arányos a közöttük lévő távolsággal, vagyis a galaxisok vöröseltolódásának egyenesen arányosnak kell lennie a tőlünk mért távolságukkal – és pontosan ez volt az, amit Hubble felfedezett. Modelljének sikere ellenére Friedmann munkájáról a nyugati világ szinte egyáltalán nem szerzett tudomást, mindaddig, amíg 1935-ben Howard Robertson amerikai fizikus és Arthur Walker brit matematikus hasonló modelleket nem alkotott a Világegyetem Hubble által felfedezett egyenletes tágulásának értelmezésére.



A Világegyetem, mint táguló gömb.

A Világegyetem tágulása következtében minden galaxis távolodik az összes többitől. Akárcsak a felfújódó léggömb felületére festett pontok esetében, az egymástól távolabbi galaxisok távolsága az idő múlásával gyorsabban nő, mint a közelié. Ezért egy kiszemelt galaxisban tartózkodó megfigyelő azt tapasztalja, hogy minél távolabb van egy galaxis, annál nagyobb sebességgel látszik mozogni.

Friedmann csak egyetlen világmodellt vezetett le. Ám ha feltevései helytállóak, akkor az Einstein-egyenleteknek három lehetséges megoldása létezik. A három különböző Friedmann-modell a Világegyetem három lehetséges viselkedését adja meg.

Az első típusú megoldásnál a Világegyetem elég lassan tágul, ezért a galaxisok közötti gravitációs vonzás fokozatosan lassítja, majd végül megállítja a tágulást. Ezután a galaxisok közeledni kezdenek egymás felé, így az egész Világegyetem összehúzódik. A második típusú megoldásnál a Világegyetem tágulása olyan gyors, hogy a gravitációs vonzás sohasem képes megállítani, bár kissé lassítja. Végül létezik egy harmadik megoldás is, eszerint a Világegyetem éppen olyan sebességgel tágul, ami pontosan elegendő az összeomlás elkerüléséhez. A galaxisok távolodási sebessége egyre csökken, de soha nem éri el a nullát.

Az első típusú Friedmann-modell figyelemre méltó sajátossága, hogy ebben a Világegyetem nem végtelen a térben, de nincs is

semmiféle határa. A gravitáció olyan erős, hogy a tér szerkezete önmagába záródik. Ezt leginkább a Föld felszínéhez hasonlíthatnánk, amely ugyancsak véges, azonban nincs határa. Ha elindulunk a Föld felszínén egy tetszés szerinti irányba, akkor soha nem érkezünk el valamilyen áthatolhatatlan akadályhoz, és nem is esünk le a Föld szélén, viszont visszaérkezünk oda, ahonnan elindultunk. E modell szerint a tér pontosan ilyen szerkezetű, csak a Föld kétdimenziós felszíne helyett három dimenzióban. Az elgondolás, mely szerint körbe tudjuk járni az egész Világegyetemet, majd visszaérkezünk a kiindulási helyünkre, hálás témát nyújt a tudományos-fantasztikus történetek íróinak, ám nincs túl nagy gyakorlati jelentősége, mert kimutatható, hogy a Világegyetem hamarabb omlik össze nulla kiterjedésűvé, mint ahogy sikerülne körbeérnünk. Olyan nagy ugyanis, hogy a fénysebességnél gyorsabban kellene utaznunk, ha még a Világegyetem történetének vége előtt meg akarnánk érkezni – márpedig ezt a relativitáselmélet nem engedi meg! A tér a második Friedmann-modell szerint is görbült, csak éppen másként. Csak a harmadik Friedmann-modell felel meg egy olyan Világegyetemnek, amelyben a nagy léptékű geometria a tér sík szerkezetét adja (természetesen a nagy tömegű objektumok közelében a tér szerkezete ebben az esetben is torzult). Vajon melyik Friedmann-modell írja le helyesen a mi Világegyetemünket? Megáll-e majd egyszer a Világegyetem tágulása, és elkezd összehúzódni, vagy a végtelenségig tart a tágulás?

Kiderült, hogy erre a kérdésre sokkal bonyolultabb a válasz, mint azt a tudósok kezdetben gondolták. Az elemzések eredménye két dologtól függ: a Világegyetem tágulásának jelenlegi sebességétől és jelenlegi átlagsűrűségétől (az adott térfogatban lévő anyag mennyiségétől). Minél gyorsabb a pillanatnyi tágulás, annál erősebb gravitációra van szükség a megállításához, és így annál nagyobb átlagsűrűség szükséges. Ha az átlagsűrűség nagyobb egy kritikus értéknél (amelyet a tágulás üteme alapján határozunk meg), akkor az anyag gravitációs vonzása sikeresen megállítja a tágulást, és előidézi az összehúzódást – amint az az első Friedmann-modellből következik. Ha az átlagsűrűség kisebb a kritikusnál, akkor a gravitáció nem elegendő a tágulás megállításához, így a

Világegyetem örökké tágulni fog – a második Friedmann-megoldás szerint. Végül, ha az átlagsűrűség pontosan egyenlő a kritikus értékkel, akkor a tágulás a végtelenségig lassul, egyre jobban megközelítve, de soha el nem érve a statikus állapotot. Ez a harmadik Friedmann-modellnek felel meg.

De vajon melyik az igaz? A galaxisok távolodási sebességének mérésével és a Doppler-effektus segítségével meg tudjuk határozni a tágulás jelenlegi ütemét. Ez a mérés nagyon pontosan elvégezhető. Igaz, hogy a galaxisok távolságát nem túl jól ismerjük, mert csak közvetve tudjuk megmérni. Így csak annyit jelenthetünk ki, hogy a Világegyetem mérete egymilliárd évenként 5-10 százalékkal lesz nagyobb. A Világegyetem jelenlegi átlagsűrűségére vonatkozó becsléseink ennél sokkal bizonytalanabbak. Mégis, ha összeadjuk a Tejútrendszerben és az összes többi galaxisban látható csillagok tömegét, az még a tágulás ütemére vonatkozó legalacsonyabb becslés esetén is alig egy százalékát teszi ki a Világegyetem tágulásának megállításához szükséges tömegnek.

Ezzel azonban még nem érkeztünk a történet végére. Tejútrendszerünknek és a többi galaxisnak nagy mennyiségű „sötét anyagot^{*}” kell tartalmaznia, amelyet közvetlenül nem látunk ugyan, de a galaxisokhoz tartozó csillagokra gyakorolt gravitációs vonzásából mégis tudjuk, hogy ott kell lennie. Talán a legjobb bizonyítékot a Tejútrendszer és a hozzá hasonló galaxisok peremvidékén keringő csillagok szolgáltatják. Ezek a csillagok túlságosan gyorsan mozognak pályájuk mentén ahhoz, hogy a galaxisban látható csillagok együttes gravitációs vonzása elegendő legyen a pályán tartásukhoz. Továbbá, mivel a legtöbb galaxis halmazokba csoportosul, ugyancsak következtetni tudunk a sötét anyag jelenlétére a halmazok galaxisai közötti térben, a galaxisok mozgására gyakorolt gravitációs hatásából. Valójában a sötét anyag mennyisége a Világegyetemben jelentősen felülmúlja a közönséges anyagét. Ám ha összeadjuk, mennyi sötét anyagot feltételezhetünk az említett helyeken, még mindig csak körülbelül tizedannyi tömeget kapunk, mint amennyi a tágulás megállításához kellene. Létezhetnek azonban a sötét anyag további formái is, amelyek csaknem egyenletesen oszlanak el a térben, de eddig még nem tudtuk jelenlétüket kimutatni. Létezik például az elemi részecskéknek^{*} egy

különleges típusa, a neutrínó^{*}. Ez a részecske csak nagyon gyengén lép kölcsönhatásra a közönséges anyaggal, ezért rendkívül nehéz kimutatni (az egyik legújabb neutrínókísérletben a föld alatti detektor ötvenezer tonna vizet tartalmaz). A neutrínót korábban tömeg nélkülinek gondolták, ezért gravitációs hatásával sem számoltak. Az elmúlt néhány évben végzett kísérletek viszont arra engedtek következtetni, hogy a neutrínónak mégiscsak van nyugalmi tömege, bár nagyon csekély. Ha viszont a neutrínóknak van tömegük, akkor a sötét anyag egyik formáját alkothatják. Mindamellet még a neutrínó tömegét megengedve is sokkal kevesebbnek tűnik a Világegyetemben található anyag mennyisége a tágulás megállításához szükségesnél, ezért egészen a közelmúltig a legtöbb fizikus egyetértett abban, hogy a második típusú Friedmann-modell – vagyis az örökké táguló állapot – felel meg a valóságnak.

Ezután viszont néhány új megfigyelési eredmény született. Az elmúlt években több kutatócsoport is tüzetesebb vizsgálat tárgyává tette a mikrohullámú háttérsugárzás finom fodrozódását. Ezeknek az apró egyenetlenségeknek a nagyságából jól lehet következtetni a Világegyetem nagy léptékű szerkezetére. Eszerint a Világegyetem egyértelműen sík szerkezetűnek tűnik – vagyis olyan, mint amilyennek a harmadik Friedmann-modell mondja! Mivel a látható és a sötét anyag együttesen sem képes magyarázatot adni erre, a fizikusok a megfigyelés magyarázatára bevezettek egy eddig még ismeretlen fogalmat – a sötét energiát.

Hogy a helyzet még bonyolultabb legyen, a legújabb megfigyelések tanúsága szerint a Világegyetem tágulásának üteme korántsem lassul, hanem éppen ellenkezőleg: gyorsul. Ez viszont egyik Friedmann-moddellel sem egyeztethető össze! A jelenség annál is furcsább, mert a térben jelen lévő anyagnak – akár kicsi, akár nagy a sűrűsége – csak egyféle hatása lehet: lassíthatja a tágulást. Ha a kozmikus tágulás üteme mégis gyorsul, az olyan, mintha egy bomba robbanása után az energia nem nyelődne el, hanem a széjjelrepülő darabok valahonnan még további energiára tennének szert. Miféle erő okozhatja a kozmosz egyre gyorsabb ütemű széjjellökődését? Ma még senki sem tud erre a kérdésre bizonyossággal válaszolni, ám a végén még az is kiderülhet, hogy Einsteinnek mégiscsak igaza volt, amikor a kozmológiai állandót (és annak antigravitációs hatását)

bevezette.

A technológia gyors fejlődésének, és az egyre újabb és nagyobb teljesítményű űrtávcsövek megjelenésének köszönhetően egyre több és egyre meglepőbb dolgokat tudunk meg a Világegyetemről. Jelenleg meglehetősen pontos képet tudunk felrajzolni a fejlődés jövőbeni menetéről: a Világegyetem tágulása örökké tart, még hozzá egyre gyorsabb tempóban. Az idő örökké tart tehát, legalábbis azok számára, akik kellően elővigyázatosak és nem esnek bele egy fekete lyukba^{*}. De mi a helyzet a kezdetekkel? Hogyan kezdődött a Világegyetem története, és mi indította el a tágulást?

NYOLCADIK FEJEZET

Ősrobbanás^{*}, fekete lyukak és a Világegyetem fejlődése

Friedmann első világmodelljében a negyedik dimenzió, az idő – akárcsak a tér – véges kiterjedésű. Olyan, mint egy szakasz, amelynek két végpontja van. Vagyis az időnek nemcsak vége van, hanem kezdete is. Valójában az Einstein-egyenleteknek a megfigyelt nagyságú tömeget tartalmazó Világegyetemre vonatkozó minden megoldásának van egy közös tulajdonsága: valamikor a múltban (mintegy 13,7 milliárd évvel ezelőtt) a szomszédos galaxisok közötti távolságnak nullának kellett lennie. Más szavakkal, az egész Világegyetemnek egyetlen, nulla méretű pontba vagy nulla sugarú gömbbe kellett összezsúfolva lennie. Abban az időben a Világegyetem átlagsűrűségének és a téridő görbületének végtelennek kellett lennie. Ez volt az az állapot, amelyet Ősrobbanásnak nevezünk.

Minden kozmológiai elméletünk arra a feltevésre épül, mely szerint a téridő szerkezete sima és közel sík. Ez azt jelenti, hogy elméleteink az Ősrobbanás környékén csődöt mondanak: a végtelen görbületű téridő ugyanis a legnagyobb jóindulattal sem nevezhető „megközelítőleg sík”-nak! Még ha történt is valami az Ősrobbanás előtt, az arról szóló ismereteinket akkor sem használhatnánk a későbbi történések felderítésére, hiszen az előre jelezhetőség az Ősrobbanáskor megszűnt volna.

Ennek megfelelően, ha csak azt tudjuk, mi történt az Ősrobbanás

után (ahogy a valóságban éppen ez a helyzet), akkor ezek az információk hasznavehetetlenek, ha azt akarjuk kikövetkeztetni, mi történhetett korábban. Mivel az Ősrobbanást megelőző eseményeknek amúgy sem lehet hatásuk a későbbiekre, ezért a Világegyetemről alkotott tudományos modellnek nem is kell ezekkel foglalkoznia. Tehát ezeket az eseményeket nyugodtan kizárhatjuk modelljeinkből, és kijelenthetjük, hogy az Ősrobbanás jelentette az idő kezdetét. Eszerint tehát az olyan kérdések, hogy ki állította be az Ősrobbanás körülményeit, nem tartoznak a természettudomány hatáskörébe.

Még egy fizikai mennyiség értéke végtelen volt, amikor a Világegyetem nulla kiterjedésű volt: a hőmérsékleté. Úgy véljük, hogy az Ősrobbanáskor a Világegyetem végtelenül forró volt. Amint elkezdett tágulni, a sugárzás hőmérséklete csökkent. Mivel a hőmérséklet egyszerűen a részecskék átlagos energiájának – sebességének – a mértéke, a Világegyetem hűlésének jelentős hatással kellett lennie a benne található anyagra. Nagyon magas hőmérsékleten a részecskék olyan szédítő sebességgel száguldoznak fel-alá, hogy bármiféle vonzóerő hatása alól kimenekülnek, legyen az magerő vagy elektromágneses vonzás. Amikor azonban a hőmérséklet csökken, arra számíthatunk, hogy az egymást vonzó részecskék elkezdenek összeállni. Még az is a hőmérséklettől, illetve ezen keresztül a Világegyetem korától függ tehát, hogy milyen fajta részecskék találhatók a Világegyetemben.

Arisztotelész nem hitte el, hogy az anyag részecskékből áll, ő még folytonosnak vélte az anyagot. Szerinte tehát egy kis anyagdarab korlátlanul tovább osztható egyre kisebb és kisebb darabokra: soha nem érhetünk el egy olyan parányi anyagszemcséhez, amelyet ne lehetne tovább darabolni. Néhány görög tudós, köztük Démokritosz, azonban az anyagot eredendően szemcsésnek tartotta, és úgy vélte, hogy minden anyag nagy számú, különböző fajta atomból épül fel. (Az atom szó görögül „oszthatatlan”-t jelent.) Ma már tudjuk, hogy Démokritosz feltételezése helyes volt, legalábbis ami mostani környezetünket és a Világegyetem jelenlegi állapotát illeti. A Világegyetemünket felépítő atomok azonban nem mindig léteztek, ráadásul nem is oszthatatlanok, és csak a Világegyetemben található részecskék csekély töredékét képviselik.

Az atomok kisebb részecskékből épülnek fel: elektronokból*, protonokból és neutronokból*. A protonok és a neutronok maguk is kisebb részecskékből, a kvarkokból* állnak. Emellett minden egyes ilyen szubatomi részecskének létezik az antirészecskéje*. Az antirészecskék tömege ugyanakkora, mint a nekik megfelelő részecskéké, elektromos töltésük és más tulajdonságaik azonban ellentétesek. Így például az elektron antirészecskéjét pozitronnak* nevezzük, ennek elektromos töltése pozitív, vagyis éppen ellentéte az elektronénak. Az antirészecskékből egész antivilágok és antiemberek is felépülhetnének. Van azonban egy bökkenő: amikor az antirészecskék a közönséges részecskepárjukkal találkoznak, annihilálódnak, vagyis maradéktalanul sugárzássá alakulnak. Ha tehát találkozunk antiönmagunkkal, még véletlenül se fogjunk vele kezét – máskülönben mindketten iszonyú erejű fényfelvillanás kíséretében eltűnünk!

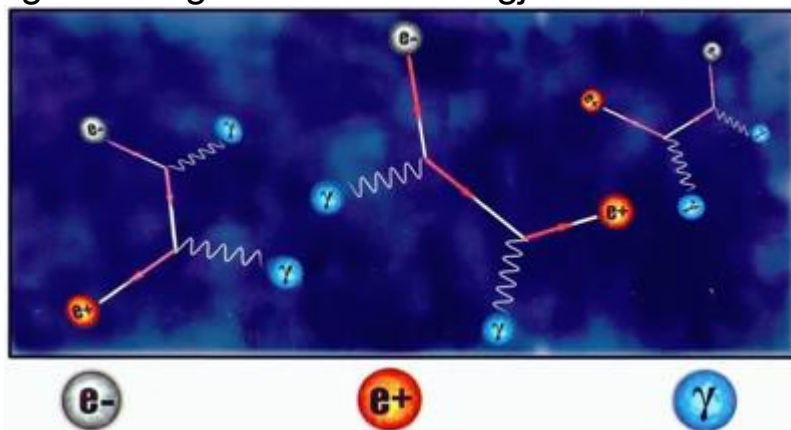
A fényenergiát egy egészen más fajta, tömeg nélküli elemi részecske, a foton* hordozza. A Földre érkező fotonok legjelentősebb forrása a Nap közelünkben működő nukleáris kohója. A Nap azonban még egy fajta részecske forrása, a korábban már említett neutrínóké (és antineutrínóké). Ezek a roppant könnyű részecskék azonban szinte alig lépnek kölcsönhatásba az anyaggal, ezért másodpercenként milliárdszámra haladnak keresztül a testünkön. Mindent összevetve, a fizikusok ezen elemi részecskék tucatjait fedezték már fel. Az idő múlásával, a Világegyetem bonyolult fejlődése részeként az elemi részecskék eme állatkertjében is változások történtek. Ez a fejlődés tette lehetővé a bolygók, mint például a Föld kialakulását, és a hozzánk hasonló lények létezését.

Egy másodperccel az Ősrobbanás után a Világegyetem már eléggé kitágult ahhoz, hogy hőmérséklete tízmilliárd Celsius-fok körülire csökkenjen. Ez körülbelül ezerszer akkora, mint a Nap belsejében uralkodó hőmérséklet, ilyen magas hőmérséklet csak a hidrogénbombák felrobbanásának pillanatában jön létre. Ebben az időben a Világegyetemennek legnagyobbbrészt fotonokat, elektronokat és neutrínókat valamint ezek antirészecskéit kellett tartalmaznia, kevés protonnal és neutronnal elegyítve. Ezeknek a részecskéknek

akkor még olyan óriási volt az energiájuk, hogy amikor összeütköztek egymással, számtalan különböző részecske-antirészecske párt hoztak létre. Az egymással ütköző fotonok például egy elektront, és az antirészecskéjét, vagyis egy pozitront keltenek. Az újonnan keletkező részecskék némelyike hamarosan összeütközött anti-testvérével, és annihilálódott. Amikor egy elektron összetalálkozik egy pozitronnal, a két részecske szétsugárzódik, ugyanez a folyamat visszafelé azonban nem játszódik le ilyen könnyen. Ahhoz, hogy két tömeg nélküli részecske, például foton részecske-antirészecske párt keltsen, az összeütköző, tömeg nélküli részecskéknek egy minimális értéknél nagyobb energiával kell rendelkezniük. Ez azért van így, mert az elektronnak és a protonnak tömege van, márpedig ennek az újonnan keletkező tömegnek az ütköző részecskék energiájából kell tömeggé átalakulnia. Midőn a Világegyetem folytatta tágulását, és a hőmérséklet tovább esett, egyre ritkábbak lettek az olyan ütközések, ahol rendelkezésre állt az elektron-pozitron párok létrehozásához szükséges energia, sőt, már ritkábban következtek be, mint amilyen gyakorisággal ezek a párok egymással találkozáskor szétsugárzás útján megsemmisültek. Végül soron az elektronok és a protonok nagy része annihilálódott, ennek eredményeképpen több foton jött létre, és csak viszonylag kevés elektron maradt. A neutrínók és az antineutrínók ezzel szemben csak nagyon gyengén lépnek kölcsönhatásra egymással és más részecskékkel, ezért közel sem képesek ilyen gyorsan annihilálni egymást. Ezeknek tehát még ma is jelen kell lenniük. Ha meg tudnánk figyelni őket, hatásosan tudnánk ellenőrizni a Világegyetem ősi korszakáról alkotott, fentebb vázolt képünk helyességét. Sajnos, sok milliárd év elteltével energiájuk túlságosan kicsi ahhoz, hogy közvetlenül meg lehessen figyelni őket (közvetett megfigyelésükre azonban lehet remény).

Az Ősrobbanás után mintegy száz másodperccel a Világegyetem hőmérséklete egymilliárd fokra csökkent, ez annyi, mint a legforróbb csillagok magjában uralkodó forróság. Ezen a hőmérsékleten az úgynevezett erős kölcsönhatás^{*} játszott fontos szerepet. Az erős kölcsönhatás, amelyet a 11. fejezetben fogunk részletesebben tárgyalni, rövid hatótávolságú vonzóerő, amelynek segítségével a protonok és a neutronok egymáshoz kapcsolódva atommagokat^{*}

alkotnak. Elég magas hőmérsékleten a protonoknak és a neutronoknak elegendően nagy a mozgási energiájuk (lásd az 5. fejezetet) ahhoz, hogy ütközéseiket követően szabad és független részecskékként haladjanak tovább. Egymilliárd fokon azonban már nincs elég energiájuk az erős kölcsönhatás vonzóerejének legyőzéséhez, ezért egyesülni kezdenek egymással, és deutériummagokat (nehézhidrogén-atommagokat) hoznak létre, ezek az atommagok egy protont és egy neutront tartalmaznak. Ezt követően a deutérium-atommagok újabb protonokkal és neutronokkal héliummagokká egyesülnek, amelyek két protonból és két neutronból állnak. Emellett csekély mennyiségben néhány nehezebb elem, a lítium és a berillium atommagjai is létrejönnek. Ki lehet számítani, hogy a forró-ösrobbanás-modell szerint a protonok és neutronok körülbelül negyede egyesül héliummagokká, valamint kis mennyiségben deutériumnak és más nehezebb elemeknek is keletkezniük kell. A megmaradó neutronok protonokká bomlanak el, ami a közönséges hidrogénatom atommagja.



Foton-elektron-pozitron egyensúly.

A korai Világegyetemben egyensúlyban volt egymással az elektron-pozitron párok ütközése nyomán bekövetkező fotonkeltés és az ezzel ellentétes irányú folyamat. Ahogy csökkent a Világegyetem hőmérséklete, az egyensúly a fotonok keletkezése irányába tolódott el. Végeredményben a Világegyetemben található legtöbb elektron és pozitron ütközéseik révén annihilálódott, és mostanra csak viszonylag kevés elektron maradt meg.

A Világegyetem forró, korai szakaszának ezt a képét először George Gamow (lásd a 61. oldalon) vázolta fel, egy 1948-ban, tanítványával, Ralph Alpherrel közösen írt, híres cikkében.

Gamownak jó humorérzéke volt – ezért meggyőzte a magfizikus Hans Bethét, hogy csatlakozzék hozzájuk harmadik szerzőként, így a cikk szerzői nevének kezdőbetűi ábécé sorrendben – Alpher, Bethe, Gamow – a görög ábécé első három betűjét adták: alfa, béta, gamma. Gamow ezt különösen helyénvalónak találta egy olyan cikkhez, amely a Világegyetem kezdeteivel foglalkozik. Ebben a publikációjukban tették azt a figyelemre méltó előrejelzést, hogy a Világegyetem nagyon forró, ősi állapotából (fotonok formájában) visszamaradt sugárzásnak még ma is körül kell vennie bennünket, noha hőmérsékletének már néhány fokkal az abszolút nulla közelébe kellett csökkennie. (Az abszolút nulla fokos^{*} hőmérséklet 273 Celsius-foknak felel meg, ezen a hőmérsékleten az anyagoknak már nincs hőenergiájuk, ezért ez az elméletileg lehetséges legalacsonyabb hőmérséklet.)

Ez volt az a mikrohullámú sugárzás, amelyet Penzias és Wilson 1965-ben megtalált. Abban az időben, amikor Alpher, Bethe és Gamow megírta nevezetes közös cikkét, még nem sokat lehetett tudni a protonok és a neutronok magreakcióiról. A különböző elemek ősi Világegyetemben kialakult arányára vonatkozó becslések ennek következtében meglehetősen pontatlanok voltak. Később azonban, immár a pontosabb ismeretek birtokában, megismételték a számításokat, és a megfigyelésekkel jól egyező eredményeket kaptak. Sőt mi több, nagyon nehéz lenne másképpen megmagyarázni, miért éppen a tömeg egynegyede van jelen a Világegyetemben hélium formájában.

Eljött azonban néhány probléma a felvázolt képpel kapcsolatban. A forró Ősrobbanás elmélete szerint a korai Világegyetemben nem állt rendelkezésre elég idő ahhoz, hogy a hő eljusson az egyik tartományból a másikba. Ez azt jelenti, hogy a kezdeti állapotban a hőmérsékletnek mindenütt pontosan ugyanakkorának kellett lennie, máskülönben nem tudnánk megmagyarázni, miért azonos a mikrohullámú háttérsugárzás hőmérséklete minden irányban. Sőt, a tágulás kezdeti ütemét is nagyon pontosan kell megválasztanunk, ha azt akarjuk, hogy a tágulás üteme még ma is nagyon közel legyen az összeomlás elkerüléséhez szükséges kritikus értékhez. Nagyon nehéz lenne megmagyarázni, miért kellett volna pontosan így kezdődnie a Világegyetem történetének, hacsak nem feltételezzük

Isten beavatkozását, akinek szándékában állt a hozzánk hasonló lények megteremtése. A tudósok megpróbáltak olyan világmodellt találni, amelyben sok különböző kezdeti konfiguráció egyaránt a mai Világegyetemre hasonlító állapotokat eredményezett volna. Alan Guth, a Massachusetts-i Műszaki Egyetem (MIT) kutatója például felvetette, hogy a Világegyetem korai történetében egy nagyon gyors tágulással járó szakasz lehetett. Ezt az időszakot a Világegyetem felfúvódásának (inflációjának) nevezte el, utalva arra, hogy a tágulás átmenetileg hihetetlen sebességűvé vált. Guth szerint a Világegyetem sugara a másodperc törtrésze alatt millió millió millió millió milliószorosára nőtt (az 1-es után harminc nullát kell írni). Ez a viharos sebességű tágulás a Világegyetemben korábban jelen lévő minden egyenetlenséget kisimított, mint ahogy a léggömb ráncai is kisimulnak, amikor felfújjuk. Ilyen módon a felfúvódás magyarázatot ad arra, hogyan fejlődhetett ki a Világegyetem jelenlegi, sima és homogén állapota sok különböző, nem homogén kezdeti állapot bármelyikéből. Ezért ma már meglehetősen bizonyosak vagyunk abban, hogy a felvázolt képünk helytálló, legalábbis az Ősrobbanást követő egy milliárdod billiomod billiomod másodpercig.

Miután ezek a kezdeti zűrzavarok az Ősrobbanást követően mindössze néhány óra alatt lecsillapodtak, leállt a hélium és a többi elem, például a lítium keletkezése. Ettől kezdve nagyjából egymillió éven keresztül folytatódott a tágulás, de ezenkívül semmi említésre érdemes esemény sem történt. Végül, amikor a hőmérséklet néhány ezer fokra csökkent, az elektronok és az atommagok energiája már nem volt elegendő a közöttük ébredő elektromágneses vonzás legyőzéséhez, ezért elkezdődött atomokká egyesülésük. A Világegyetem egésze tovább tágult és hűlt, azonban egyes, az átlagosnál valamivel nagyobb sűrűségű tartományokban a tágulást lassította a megnövekedett gravitációs vonzás.

Ez a vonzás egyes tartományokban megállította a tágulást, és elindította az összehúzódást. Az összehúzódó anyagcsomók a tartományon kívüli anyag vonzása következtében lassú forgásba jöhettek. Ahogy csökkent az összehúzódó tartomány mérete, úgy gyorsult a forgása – éppúgy, ahogy a műkorcsolyázó forgása is gyorsul, amikor behúzza mindkét karját. Végül, amikor ezek a tartományok már elég kicsik lettek, akkor elegendően gyorsan

forogtak ahhoz, hogy a forgás egyensúlyt tartson a gravitációval, így megszülettek a korong alakú, forgó galaxisok. Más tartományok, amelyek nem jöttek forgásba, elnyúlt, tojásszerű objektumokká fejlődtek, ezeket elliptikus galaxisoknak nevezzük. Az elliptikus galaxisokban azután megállt az összehúzódás, mert egyes részei stabil keringésbe kezdtek a rendszer középpontja körül, de a galaxis egésze nem forgott.

Az idő múlásával a galaxisokat alkotó hidrogén- és héliumgáz kisebb csomókra szakadozott, amelyek saját gravitációjuk hatására összeroskadtak. Ahogy összehúzódtak, és atomjaik egyre gyakrabban ütköztek egymásnak, hőmérsékletük emelkedni kezdett, míg végül elég magas lett a nukleáris fúzió^{*} beindulásához. Ennek során a hidrogénmagokból további hélium keletkezett. A reakció nem más, mint egy szabályozott körülmények között végbemenő hidrogénbomba-robbanás, eközben hő szabadul fel, aminek következtében a csillag világít. Ez a többlethő megnöveli a gáz nyomását, amíg az végül képes lesz egyensúlyt tartani a gravitációs vonzással, ennek következtében megáll a gáz összehúzódása. Ily módon tehát ezek a felhők a Napunkhoz hasonló csillagokká tömörülnek össze, amelyek hidrogént alakítanak át héliummá, a felszabaduló energiát pedig hő és fény formájában kisugározzák. Az egész egy kicsit a léggömbre hasonlít, ahol a benne lévő levegő nyomása, ami tágítani szeretné a léggömböt, egyensúlyt tart a gumiban ébredő rugalmas feszültséggel, ami viszont kisebbre igyekszik zsugorítani a léggömböt.

Miután a forró gázfelhők csillagokká sűrűsödtek, a csillagok hosszú időn keresztül stabilak maradnak, a magreakciók termelte hő mindvégig egyensúlyt tart a gravitációval. Végül azonban a csillag belsejében elfogy a hidrogén és a többi nukleáris üzemanyag. Paradox módon, minél több üzemanyag áll a csillag rendelkezésére kezdetben, annál hamarabb elfogyasztja azt. Ez azért van így, mert minél nagyobb tömegű a csillag, annál forróbbnak kell lennie, hogy egyensúlyt tudjon tartani a gravitációval. Márpedig minél forróbb a csillag, annál hevesebbek a magreakciók, és így annál hamarabb felemésztí egész üzemanyagkészletét. Napunk valószínűleg még további ötmilliárd évre elegendő nukleáris tüzelőanyagot raktároz a belsejében, de a nagyon nagy tömegű csillagok egész

üzemanyagkészletüket akár százmillió év alatt is felélhetik, ami a Világegyetem koránál sokkal rövidebb időtartam.

Amikor a csillag belsejében elfogy a magreakciók üzemanyaga, a csillag hűlni kezd, a gravitáció diadalmaskodik a sugárzás fölött, ezért az égitest összehúzódik. Az összehúzódás egymáshoz préseli az atomokat, így a csillag ismét felforrósodik. Amikor a belseje elég forró lesz, elkezdődik a hélium átalakulása nehezebb elemekké, mint például szénre és oxigénre. Ezek a reakciók azonban nem túl sok energiát termelnek, ezért a válság folytatódik. Ami ezután történik, az nem teljesen világos, de valószínűnek tűnik, hogy a csillag központi tartományai nagyon sűrű állapotúvá omlanak össze, például fekete lyukká. A „fekete lyuk” kifejezés meglehetősen új keletű. John Wheeler amerikai fizikus vezette be 1969-ben egy olyan elképzelés szemléletes leírásaként, amely legalább kétszáz éves múltra tekinthet vissza. Abban az időben két rivális elmélet írta le a fény természetét. A Newton által pártfogolt vélekedés szerint a fény részecskékből áll, a másik elgondolás szerint hullámok alkotják. Ma már tudjuk, hogy éppenséggel mindkét felfogás helyes. Amint a 9. fejezetben látni fogjuk, a kvantummechanika hullám-részecske kettősségének^{*} köszönhetően a fény egyaránt tekinthető részecskének és hullámnak. A leírására szolgáló hullám és részecske fogalmakat az ember alkotta, ezért nem szükségszerűen olyan fogalmak, amelyekhez a természetnek oly módon kellene alkalmazkodnia, hogy minden jelensége vagy az egyik, vagy a másik kategóriába sorolódjék!

A fényt hullámnak tekintő elmélet keretein belül nehezen lehetett megmagyarázni a fény reagálását a gravitációra. Ha viszont részecskékből állónak képzeljük el a fényt, akkor arra kell számítanunk, hogy ezekre a részecskékre ugyanolyan hatást gyakorol a gravitáció, mint az ágyúgolyókra, a rakétákra vagy a bolygókra. Ha például a Föld – vagy egy csillag – felszínéről függőlegesen felfelé kilövünk egy ágyúgolyót, akkor – amint azt az 58. oldalon a rakéta példáján láttuk – az bizonyos magasságig történő emelkedés után megáll és visszaesik a Földre, hacsak nem ér el a kezdősebessége egy meghatározott értéket. Ezt a Föld elhagyásához minimálisan szükséges kezdősebességet szökési sebességnek nevezzük. Egy csillag felszínén a szökési sebesség a

csillag gravitációs erejétől függ. Minél nagyobb tömegű a csillag, annál nagyobb a szökési sebesség. Kezdetben az emberek azt hitték, hogy a fény részecskéi végtelen sebességgel száguldanak, ezért a gravitáció nem képes lassítani őket. Ám Römer felfedezésének, miszerint a fény véges sebességgel terjed, volt egy idevágó, fontos következménye: ha a csillag tömege elég nagy, akkor a fény sebessége kisebb lesz a csillagra vonatkozó szökési sebességnél, így a csillag által kisugárzott fény vissza fog hullani a csillagra. E feltevésből kiindulva John Michell, a Cambridge-i Egyetem tanára 1783-ban megjelentetett egy cikket a Philosophical Transactions of the Royal Society of London című folyóiratban. Cikkében rámutatott, hogy egy elegendően nagy tömegű és kompakt csillag gravitációs tere elég erős lenne ahhoz, hogy a fény ne hagyhasssa el a csillagot: a gravitációs vonzás a csillag felszínét elhagyó összes fényt visszahúzná a csillag felszínére, még mielőtt nagyobb távolságra juthatna. Ezek azok az objektumok, amelyeket ma fekete lyukaknak nevezünk. Az elnevezés találó, mert ezek az égitestek valóban fekete üregek a térben.



*A szökési sebességnél lassúbb és gyorsabb ágyúgolyók.
Ami felfelé törekszik, annak nem feltétlenül kell visszaesnie – feltéve,
hogy az ágyúgolyót a szökési sebességnél nagyobb sebességgel
lőjük ki.*

Hasonló elképzelést vetett fel néhány évvel később, de nyilvánvalóan Michell-től függetlenül, a francia természettudós, Laplace márki. Érdekes módon Laplace erre vonatkozó gondolatait

csak *Exposition du systeme du monde* (A világ rendszerének bemutatása) című könyve első és második kiadásában fejtette ki, a későbbi kiadásokból már kihagyta. Talán úgy gondolta, hogy örültség a gondolat – annál is inkább, mert a XIX. század folyamán a fény részecskeelmélete kiment a divatból, ugyanis úgy tűnt, hogy a hullámelmélettel minden megfelelően megmagyarázható. Valójában nem áll teljes összhangban Newton gravitációelméletével, ha a fényt az ágyúgolyókhoz hasonló részecskéknek tekintjük, mivel a fény sebessége minden körülmények közt állandó. A Földről felfelé kilőtt ágyúgolyó viszont a gravitáció hatására lassul, majd végül megáll és visszaesik. A fotonnak ezzel szemben változatlan sebességgel tovább kell mennie fölfelé. A gravitáció fényre gyakorolt hatását konzisztens módon tárgyaló elméletre egészen Albert Einstein 1915-ben publikált általános relativitáselméletig kellett várni. Azt a problémát viszont, hogy mi történik az általános relativitáselmélet szerint egy nagy tömegű csillag közelében a fénnel, csak egy fiatal amerikai tudós, Robert Oppenheimernek sikerült megoldania, 1939-ben.

Az Oppenheimer munkája alapján kialakult kép a következő. A csillag gravitációs tere a téridőben elgörbíti a mellette elhaladó fénysugarak pályáját, ahhoz képest, mintha a csillag nem lenne ott. Ezt a jelenséget vehetjük észre napfogyatkozásakor, amikor a Nap gravitációs tere elgörbíti a távoli csillagokból érkező fénysugarakat. A csillag fénye által térben és időben követett pálya a csillag felszíne közelében enyhén befelé görbül. Amikor a csillag összehúzódik, sűrűbbé válik, ezért felszínén erősebb lesz a gravitációs tér. (A gravitációs teret a csillag középpontjából, azaz egyetlen pontból eredőnek képzelhetjük el. Amikor a csillag összehúzódik, felszíne közelebb kerül a középpontjához, így erősebb teret érzékel.) Az erősebb gravitációs tér hatására a felszín közelében a fénysugarak erősebben görbülnek befelé. Végül, amikor összehúzódása során a csillag sugara elér egy kritikus értéket, olyan erős lesz a felszínén a gravitáció, hogy a fénysugarak már annyira elgörbülnek, hogy többé nem tudnak kiszabadulni.

A relativitáselmélet szerint semmi sem haladhat a félynél gyorsabban. Ha tehát a fény nem tud megszökni, akkor semmi más sem: minden a gravitációs tér fogságába esik. Az összeomlott csillag

a téridő olyan tartományát hozza létre maga körül, amelyből nem lehetséges kijutni és elérni egy távoli megfigyelőig. Ezt a tartományt nevezzük fekete lyuknak. A fekete lyuk külső határát eseményhorizontnak^{*} hívjuk. Jelenleg, a Hubble-űrtávcsőnek és más, a világűrbe telepített, de a röntgen- és gamma-sugárzást észlelő távcsöveknek köszönhetően tudjuk, hogy a fekete lyuk meglehetősen gyakori objektum – sokkal gyakoribb, mint első pillanatban gondolnánk. Az egyik műhold csak az égbolt egy kis területén 1500 fekete lyukat fedezett fel. Találtunk többek között egy fekete lyukat a Tejútrendszer középpontjában is, ennek tömege a Napénak több mint egymilliószorosa. A szupernagy tömegű fekete lyuk körül egy csillag a fénysebesség 2 százalékával kering, gyorsabban, mint ahogy az elektron mozog az atomban!

Ha meg akarjuk érteni, mit látnánk, ha megfigyelnénk, amint egy nagy tömegű csillag fekete lyukká omlik össze, akkor emlékezni kell arra, hogy az általános relativitáselmélet szerint nem létezik abszolút idő. Más szavakkal, minden megfigyelő számára rá jellemző módon telik az idő. A csillag felszínén álló megfigyelő számára egészen más tempóban múlik az idő, mint a távoli megfigyelő számára, hiszen az előbbi sokkal erősebb gravitációs mezőben tartózkodik.

Tételezzük fel, hogy egy vakmerő űrhajós leszáll az összeomló csillag felszínére, és ott is marad, miközben a folyamat lejátszódik. A saját órája szerint egy bizonyos időpontban – mondjuk 11:00-kor – a csillag a kritikus sugárnál kisebbre zsugorodik össze, így a gravitációs tér már olyan erős, hogy semmi sem szabadulhat ki belőle. Képzeljük most el, hogy az űrhajós azt a feladatot kapta, hogy saját órája szerint másodpercenként küldjön valamilyen jelet a csillag középpontjától nagy távolságban keringő űrhajónak. A jelek sugárzását 10:59:58-kor kezdi, azaz két másodperccel 11:00 előtt. Mit fognak tapasztalni az űrhajón utazó társai?

Korábbi, a rakétára vonatkozó gondolkísérleteinkből már megtudtuk, hogy a gravitáció lassítja az idő múlását, méghozzá minél erősebb a gravitáció, annál jobban. A csillag felszínén álló űrhajós erősebb gravitációs térben tartózkodik, mint a csillag körül keringő társai, ami tehát számára egy másodperc, az az űrhajón utazó kollégái számára hosszabb idő lesz. Amint a csillag felszínével együtt halad a teljes összeomlás felé, az általa érzékelt gravitációs

tér egyre erősebb lesz, ezért a jelek közötti időtartam egyre hosszabb lesz az űrhajón érzékelt másodperceknél. Az idő „megnyúlása” 10:59:59 előtt még csekély marad, ezért az űrhajó utasainak egy másodpercnél alig valamivel hosszabb ideig kell várniuk társuk saját órája szerint 10:59:58-kor és 10:59:59-kor kibocsátott jelei beérkezése között. A 11:00-kor kibocsátott jelre viszont már végtelenül hosszú ideig kell várniuk.



Árapályerők.

Minthogy a gravitáció a távolság növekedésével gyengül, a Föld kisebb erővel vonzza a fejünket, mint a lábunkat, hiszen az utóbbi egy-két méterrel közelebb van a Föld középpontjához. A különbség olyan parányi, hogy nem érzékeljük, azonban a fekete lyuk felszíne közelében tartózkodó űrhajós testét ugyanez a hatás szó szerint széttépné.

Minden, ami a csillag felszínén (az ott tartózkodó űrhajós órája szerint) 10:59:59 és 11:00 között történik, az űrhajóból nézve végtelenül hosszú időre húzódik széjjel. Ahogy közeledik a 11:00 óra, a csillag fényének egymást követő hullámhegyei és hullámvölgyei egyre hosszabb időközönként érkeznek, hasonlóan ahhoz, ahogy az űrhajós által kibocsátott jelek közötti időtartam is nőtt. Minthogy a fény frekvenciája a másodpercenként beérkező hullámhegyek vagy hullámvölgyek számával egyenlő, az űrhajó utasai számára a csillag fényének frekvenciája egyre csökken. Emiatt a csillag egyre vörösebbnek látszik (miközben fokozatosan halványodik is). Végül a csillag annyira elhalványodik, hogy már egyáltalán nem is látszik az űrhajóról: semmi más nem marad a helyén, csak egy fekete lyuk a térben. Ez azonban továbbra is változatlan gravitációs erőt fejt ki az űrhajóra, így az folytatja keringését a fekete lyuk körül.

A leírt forgatókönyv azonban nem teljesen felel meg a valóságnak, a következő probléma miatt. Minél messzebb vagyunk a csillagtól,

annál gyengébb a gravitáció, ezért a merész űrhajós lábára mindig erősebb vonzóerő hat, mint a fejére. Az erőkülönbség spagettiként megnyújtaná, vagy akár szétszakítaná a testét, még mielőtt a csillag elérné a kritikus sugarat, amelynél az eseményhorizont kialakul. Azonban úgy gondoljuk, hogy léteznek a Világegyetemben sokkal nagyobb objektumok is, amelyekben ugyancsak végbemehet a fekete lyuk kialakulását eredményező gravitációs összeomlás, ilyenek például a galaxisok középponti vidékei. Egy ilyen objektum felszínén tartózkodó űrhajóst nem tépnének szét a rá ható erők még a fekete lyuk kialakulása előtt. Semmi különös sem érezne, amikor az égitest elérné a kritikus sugarat, sőt, észre sem venné, amikor áthaladna azon a ponton, ahonnan már nincs visszatérés. A gravitációs összeomlás azonban folytatódna, és mindössze néhány órán belül (az űrhajós saját idejében mérve) a fejére és a lábára ható erők közötti különbség ebben az esetben is igen nagyra nőne, ami ismét teste szétszakadásához vezetne.

Néha, amikor egy nagyon nagy tömegű csillag összeomlik, külső rétegeinek anyaga egy hatalmas erejű robbanás, az úgynevezett szupernóva-robbanás eredményeképpen lelökődik. A szupernóva-robbanás elég nagy erejű ahhoz, hogy a csillag egy ideig több fényt sugározzon ki, mint a galaxis összes többi csillaga együttvéve. Erre az egyik példa az a szupernóva, amelynek maradványát ma a Rák-köd formájában észlelhetjük az égbolton. Kínai csillagászok 1054-ben jegyezték fel a ritka jelenséget. Bár a felrobbanó csillag ötezer fényév távolságra volt tőlünk, mégis hónapokon át szabad szemmel is lehetett látni, sőt, olyan fényesen ragyogott, hogy a nappali égen is látszott, éjjel pedig olvasni lehetett a fényénél. Egy csupán ötszáz fényév távolságban – tehát tízszer közelebb – felrobbanó szupernóva százszor fényesebb lenne, és a szó szoros értelmében nappallá változtatná az éjszakát. A robbanás fényessége a Napéval vetekedne, jóllehet tízmilliószor távolabbról érkezne. (Emlékezzünk csak vissza arra, hogy Napunk mindössze nyolc fénypercnyire helyezkedik el tőlünk.) Ha egy szupernóva a Földhöz túlságosan közel robbanna fel, akkor a Földet mint égitestet érintetlenül hagyná ugyan, de nagy energiájú sugárzása minden élőlényt elpusztítana a felszínén. A közelmúltban egyes kutatók azt is felvetették, hogy körülbelül kétmillió évvel ezelőtt, a tengeri élőlények tömeges

kipusztulását a Scorpius-Centaurus-asszociációban felrobbant szupernóva kozmikus sugárzása idézhette elő. Egyes kutatók véleménye szerint a galaxisokon belül csak olyan tartományokban – az úgynevezett „életzóná”-kban – jöhet létre magasan fejlett élet, ahol nincs túl sok csillag, mert a nagy csillagsűrűségű tartományokban a szupernóva-robbanások olyan gyakran következnek be, hogy sugárzásuk az evolúció bármely kezdeményét hamar elsöpri. Átlagosan naponta százezerszámmra robbannak fel szupernóvák valahol a Világegyetemben. Egy kiszemelt galaxisban a robbanások átlagosan évszázadonként egyszer fordulnak elő. Ez azonban csak az átlag. A csillagászok legnagyobb sajnálatára a Tejútrendszerünkben utoljára 1604-ben, tehát még a távcső felfedezése előtt következett be szupernóvarobbanás.

A Tejútrendszer következő szupernóva-robbanására jó eséllyel pályázik a Ró Cassiopeia jelű csillag. Szerencsére az égitest biztonságos és kényelmes távolságra van tőlünk, tízezer fényévre. A csillag a sárga hiperóriások csoportjába tartozik, ilyen típusú csillagot mindössze hetet ismernek a csillagászok az egész Tejútrendszerben. Egy nemzetközi csillagászcsoport 1993 óta vizsgálja ezt a csillagot. Az azt követő néhány évben a csillag hőmérsékletének néhány száz fokos ingadozását figyelték meg. Azután 2000 nyarán a hőmérséklete hirtelen 7000 Celsius-fokról 4000 fokra esett. Ebben az időszakban titán-oxidot sikerült kimutatni a légkörében, ami feltételezésük szerint arra utal, hogy egy erőteljes lökéshullám letépett a csillagról egy külső réteget.

A szupernóva-robbanáskor a csillag által élete végén előállított nehéz elemek szétszóródnak a galaxison belül, és nyersanyagul szolgálnak a csillagok későbbi generációjának keletkezéséhez. Napunk mintegy 2 százalékot tartalmaz ezekből a nehéz elemekből. A Nap ugyanis második vagy harmadik generációs csillag, amely mintegy ötmilliárd évvel ezelőtt jött létre egy korábbi szupernóva-robbanásból származó forgó gázfelhőből. A felhőt alkotó gáz legnagyobb részéből a Nap alakult ki, illetve sok gáz széjjelfújódott, ám a nehezebb elemek egy része azokban a testekben gyűlt össze, amelyek ma a Föld és a hozzá hasonló bolygók formájában a Nap körül keringenek. Az ékszereinkben lévő arany és az atomreaktorainkban átalakuló urán egyaránt a Naprendszer

keletkezése előtt felrobbant szupernóvákból származik. Amikor a Föld még éppen csak összesűrűsödött, nagyon forró volt, és nem volt légköre. Az idő múlásával fokozatosan kihűlt, és a kőzetekben lévő gázok kigőzölgéseiből légkört gyűjtött maga köré. Ez az ősi légkör azonban még nem olyan volt, amelyben élni tudnánk. Nem tartalmazott oxigént, ezzel szemben sok, számunkra mérgező gáz fordult elő benne, például (a záptojás jellegzetes bűzét adó) hidrogén-szulfid (kénhidrogén). Léteznek azonban olyan primitív élőlények, amelyek ilyen körülmények között is megélnek. Úgy gondoljuk, hogy ezek az óceánokban alakulhattak ki, valószínűleg az atomok nagyobb szerkezetekké, úgynevezett makromolekulákká történő véletlen egyesülése eredményeképpen. Ezek a makromolekulák azután már képesek voltak az óceán vizéből más atomokat összegyűjtve hasonló szerkezetűeket létrehozására. Eszerint tehát ezek a molekulák már másolták önmagukat, és szaporodtak. Néha azonban a másolás közben hibák léptek fel. A legtöbb esetben e hibák következtében olyan makromolekula keletkezett, amely nem tudta reprodukálni önmagát, és végül megsemmisült. Egyes hibák azonban olyan új makromolekulákat eredményeztek, amelyek még jobban tudták reprodukálni önmagukat. Ezek előnyösebb helyzetben voltak a régebbi makromolekulákkal szemben, ezért hamarosan kiszorították azokat. Így módon megindult az evolúció folyamata, amely végső soron egyre bonyolultabb, önreprodukáló szervezetek kifejlődéséhez vezetett. Az élet első, primitív formái különféle anyagokat használtak fel, például kénhidrogént, miközben oxigént szabadítottak fel. Ez fokozatosan átalakította a légkör összetételét, olyanná, amilyen ma is. Az oxigéntartalmú légkör lehetővé tette magasabb rendű életformák kifejlődését, kialakultak a halak, a hüllők, az emlősök, majd legvégül az ember.

A XX. században átalakult az emberiség világképe: rádöbbenünk bolygónk jelentéktelenségére a Világegyetem végtelenjében, felismertük, hogy a tér és az idő görbült és egymástól elválaszthatatlan, rájöttünk, hogy a Világegyetem tágul, és az időnek kezdete volt.

A kezdetben nagyon forró, majd tágulása következtében lehűlő Világegyetem képe Einstein gravitációelméletén, az általános

relativitáselméleten alapul. Ez összhangban van a ma rendelkezésre álló megfigyelési eredményekkel, ami nagy diadal az elmélet számára. Az elmélet megjósolja, hogy a Világegyetem története egy úgynevezett Ősrobbanással kezdődött, amikor a Világegyetem sűrűségének és a téridő görbületének végtelenül nagyoknak kellett lennie. Minthogy azonban a matematika nem tudja megfelelően kezelni a végtelen mennyiségeket, az általános relativitáselmélet megadja azt a pontot, amikor maga az elmélet már csődöt mond, mert nem alkalmas a végtelenné váló mennyiségek kezelésére. Ez a pont példa arra, amit a matematikusok szingularitásnak^{*} neveznek. Amikor egy elméletben szingularitás bukkan fel, mint például a végtelen sűrűség vagy görbület, akkor ez a legbiztosabb jele annak, hogy az elmélet módosításra szorul. Az általános relativitáselmélet nem teljes, mert nem képes megmondani, miként keletkezett a Világegyetem.

Az általános relativitáselmélet mellett a XX. század másik rendkívül jelentős részelmélete a természet megismerésének az útján a kvantummechanika volt. Ez az elmélet a nagyon parányi dolgok világának a jelenségeit írja le. Az Ősrobbanásról alkotott képünk értelmében a Világegyetem korai szakaszában léteznie kellett egy olyan időszaknak, amikor az egész Világegyetem olyan kicsi volt, hogy még a nagy léptékű szerkezete leírásakor sem szabad figyelmen kívül hagyni a kvantummechanikai hatásokat. A következő fejezetben látni fogjuk, hogy reményeink szerint e két részelmélet egyetlen elméletté, a gravitáció kvantumelméletévé egyesítése eredményeképpen jöhetne létre az az átfogó elmélet, amely a Világegyetem történetének a kezdetétől a végéig terjedő, teljes leírását adja. Ebben az elméletben a természettudomány közösleges törvényei mindenütt érvényesek lennének, beleértve az idők kezdetét is, ezért ott sem lenne szükség szingularitás bevezetésére.

KILENCEDIK. FEJEZET

Kvantumgravitáció

A tudományos elméletek, különösen Newton gravitációelméletének sikere a XIX. század elején arra ösztönözte

Laplace márkit, hogy a Világegyetemet teljes egészében determinisztikusnak tekintse. Laplace felfogása szerint léteznie kell a természettudomány törvényei közül egy olyan meghatározott csoportnak, amely – legalábbis elméletileg – lehetővé tenné a Világegyetem minden jövőbeli történésének pontos kiszámítását. A törvények alkalmazásához semmi másra nem lenne szükség, mint a Világegyetem állapotának pontos ismeretére egy adott pillanatban. Ezt kezdeti feltételnek, vagy határfeltételnek nevezzük. (A határ ebben az esetben térbeli vagy időbeli határt is jelenthet, – a térbeli határfeltétel a Világegyetem esetében annak külső határát jelenti – ha egyáltalán létezik ilyen.) Laplace úgy hitte, hogy a törvények teljes csoportjára és a megfelelő kezdeti feltételekre alapozva tetszőleges időpontra ki tudjuk számítani a Világegyetem állapotát.

A kezdeti feltételek megkövetelését valószínűleg ösztönösen nyilvánvalónak találjuk: a létezés jelenlegi különböző állapotai magától értetődően különböző jövőbeli állapotokat eredményeznek. A térbeli határfeltételek kérdése valamivel bonyolultabb, de az alapelv változatlan. A fizikai elméletek alapjául szolgáló egyenleteknek általában több megoldása is létezik, amelyek közül a határfeltételek figyelembevételével kell kiválasztanunk a megfelelőt. Kicsit olyan ez, mint amikor nagy pénzmozgások történnek a bankszámlánkon. Az, hogy a tranzakciók eredményeképpen végül csődbe megyünk, vagy meggazdagszunk, nemcsak a kapott és kifizetett összegek nagyságától függ, hanem attól is, mennyi pénz volt kezdetben a számlánkon.

Ha Laplace-nak igaza lenne, akkor ismerve a Világegyetem jelenlegi állapotát, ezen törvények segítségével a múltját és a jövőjét egyaránt kiszámíthatnánk. Ha például ismerjük a Nap és a bolygók pozícióját és sebességét, akkor Newton törvényei segítségével ki tudjuk számítani bármely korábbi vagy későbbi időpontban a Naprendszer állapotát. A bolygók esetében a determinizmus meglehetősen egyértelműnek tűnik – végső soron a csillagászok valóban nagyon pontosan ki tudják számítani a különféle égi jelenségek, például a fogyatkozások időpontját. Laplace azonban tovább ment, és azt is feltételezte, hogy minden mást is hasonló törvények irányítanak, az emberi természetet is beleértve.

De valóban lehetőségük van a tudósoknak minden jövőbeli

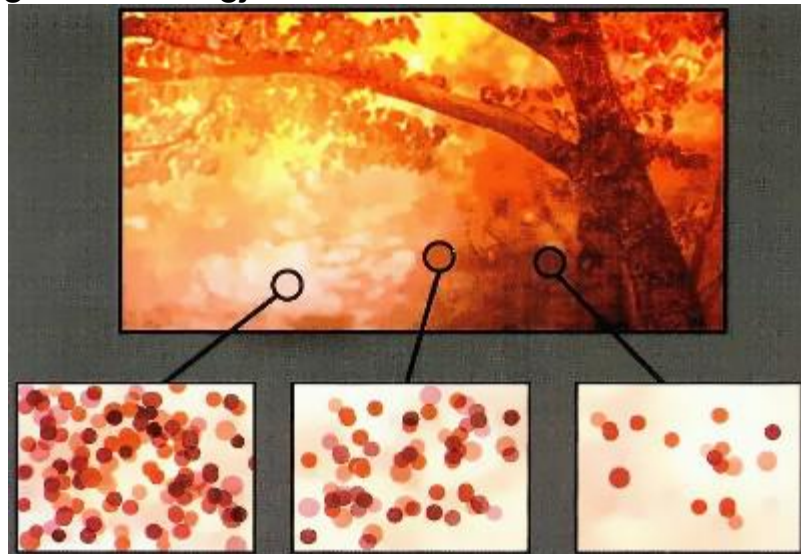
cselekedetünk kiszámítására? Egy pohár víz több mint 10^{24} molekulát tartalmaz (itt az 1-es 24 nulla követi). A gyakorlatban soha nem remélhetjük, hogy az összes molekula állapotát megismerjük, még sokkal kevésbé az egész Világegyetem vagy akár csak saját testünk állapotát. Ha mégis azt jelentjük ki, hogy a Világegyetem determinisztikus, akkor ez azt jelenti, hogy bár agyunk kapacitása nem elegendő a szükséges számítások elvégzéséhez, jövőnk ennek ellenére eleve elrendelt.

Sokan mereven ellenálltak a tudományos determinizmus doktrínájának, mert úgy érezték, hogy ezzel korlátoznák Istent, akinek szabadságában áll úgy működtetni a világot, ahogy ő jónak látja. Ennek ellenére egészen a XX. század elejéig ez maradt az uralkodó felfogás a természettudományban. Az első arra utaló jelzés, hogy esetleg ezt az egész elképzelést el kell vetni, akkor érkezett, amikor két brit tudós, Lord Rayleigh és Sir James Jeans kiszámította a feketetestek, például egy csillag által kisugárzott energia mennyiségét. (Amint a 7. fejezetben említettük, minden anyagi test, amikor felmelegítjük, feketetest-sugárzást bocsát ki.)

Az akkoriban elfogadott fizikai törvények szerint a forró testek minden frekvencián ugyanannyi elektromágneses sugárzást bocsátanak ki. Ha ez igaz lenne, akkor ugyanannyi energiát bocsátának ki a látható fény minden színében, továbbá a mikrohullámok, a rádióhullámok, a röntgensugarak tartományában és így tovább. Emlékezzünk vissza arra, hogy a hullám frekvenciája a másodpercenkénti fel-le oszcillációk száma, azaz a másodpercenkénti hullámok száma. Ha megköveteljük, hogy a forró test minden egyes frekvencián ugyanannyi energiát sugározzon ki, akkor matematikailag kifejezve ez azt jelenti, hogy ugyanannyi energiát kell kisugároznia a másodpercenként nulla és egymillió hullám közötti tartományban, mint a másodpercenként egy és két millió, két és három millió hullám közötti tartományban, és így tovább, a végtelenségig. Vegyük úgy, hogy az egyes fenti frekvenciatartományokban kisugárzott energia nagysága egységnyi, – ekkor az összes frekvencián együttesen kisugárzott energia mennyisége 1 meg 1 meg 1 meg... és így tovább, a végtelenségig. Minthogy az egy másodperc alatt beérkező hullámok számának nincs felső határa, a teljes kisugárzott energia ezt a végtelen sort

összegezve végtelenül nagynak adódik.

A nyilvánvalóan képtelen eredmény elkerülése érdekében Max Planck német fizikus 1900-ban feltételezte, hogy a fény, a röntgensugárzás és minden más elektromágneses sugárzás csak bizonyos diszkrét csomagok, úgynevezett kvantumok formájában sugárzódhat ki. Amint azt a 8. fejezetben már említettük, ma a fénykvantumát fotonnak nevezzük. Minél nagyobb a fény frekvenciája, annál nagyobb a foton energiatartalma. Ezért bár egy adott színnek, vagyis frekvenciának megfelelő fotonok mind azonosak egymással, Planck elmélete^{*} szerint a különböző frekvenciájú fotonok mégis különbözőek, mert különböző az energiatartalmuk. Ez azt jelenti, hogy a kvantumelméletben egy adott színű, lehető leghalványabb fény – az egyetlen foton – által hordozott energia mennyisége a fény színétől függ. Így például az ibolyaszínű fény frekvenciája kétszer akkora, mint a vörösé, ezért az ibolyaszínű fény egyetlen kvantumának kétszer akkora az energiája, mint a vörös fény egyetlen kvantumáénak. Eszerint az ibolyaszínű fény lehetséges legkisebb adagja kétszer akkora, mint a vörös fény lehetséges legkisebb adagja.



A lehetséges leghalványabb fény.

A halvány fényben kevesebb a foton. Bármilyen színű fényből az a leghalványabb, amelyet csak egyetlen foton hordozza.

Hogyan oldja meg ez a feltevés a feketetest sugárzásának a problémáját? A legkisebb mennyiségű elektromágneses energia, amelyet egy feketetest adott frekvencián ki tud sugározni, éppen

annyi, amennyit egyetlen, akkora energiájú foton szállít. Nagyobb frekvenciákon nagyobb a foton energiája. Eszerint nagyobb frekvencián nagyobb a legkisebb energiamennyiség, amelyet egy feketetest ki tud sugározni. Elegendően nagy frekvencián már egyetlen kvantum energiája is nagyobb, mint amennyi a sugárzó testben rendelkezésre áll, ezért a test ekkora energiájú fotonokat már egyáltalán nem fog kisugározni, vagyis a korábban végtelen sor ennél a frekvenciánál véget ér és végessé válik. Ily módon Planck elmélete korlátok közé szorítja a magas frekvenciákon kibocsátott sugárzást, a test csak véges ütemben veszít energiát, ezzel megoldva a feketetest-problémát.

A kvantumhipotézis tehát kiválóan megmagyarázza a forró testek sugárzásának megfigyelt sajátosságait, de a determinizmusra gyakorolt hatását csak 1926-ban ismerték fel, amikor egy másik német tudós, Werner Heisenberg megfogalmazta híres határozatlansági elvét^{*}.

A határozatlansági elv (vagy határozatlansági reláció) kijelenti, hogy Laplace felfogásával ellentétben a természet igenis korlátozza azon képességünket, hogy tudományos törvények felhasználásával előre jelezzük a jövőt. Ez azért van így, mert ha ki akarjuk számítani egy részecske jövőbeli helyét és sebességét, akkor ismernünk kell a kezdeti feltételeket, nevezetesen a jelenlegi helyét és sebességét, méghozzá pontosan. Ennek legegyszerűbb módja, ha egy fénysugárral megvilágítjuk a részecskét. A részecske szórni fogja a ráeső fény egy részét. Ezt a megfigyelő felfogja, és a felfogott fényből következtet a részecske helyére. Egy adott hullámhosszú fény érzékenysége azonban korlátozott: a részecske pozícióját ugyanis nem tudjuk annál pontosabban meghatározni, mint amekkora a használt fényben két hullámhegy távolsága. Ha tehát pontosabban akarjuk megmérni a részecske helyét, akkor rövidebb hullámhosszú, azaz nagyobb frekvenciájú fényt kell használnunk. Planck kvantumhipotézise értelmében azonban nem használhatunk tetszőlegesen kis mennyiségű fényt: legalább egy kvantumra szükségünk van, amelynek viszont nagyobb frekvenciájú fény esetén nagyobb az energiája. Minél pontosabban akarjuk tehát a részecske helyét megállapítani, annál nagyobb energiájú fénykvantummal kell eltalálnunk.

A kvantumelmélet értelmében már egyetlen fénkvantum is megzavarja a részecskét: előre jelezhetetlen módon megváltoztatja a sebességét. Minél nagyobb energiájú fénkvantumot használunk, annál nagyobb zavar fellépése valószínűsíthető. Ez azt jelenti, hogy ha pontosabban akarjuk meghatározni a részecske helyét, és ennek érdekében nagyobb energiájú fénkvantumot használunk, akkor erőteljesebben megzavarjuk a részecske sebességét. Minél pontosabban próbáljuk tehát meghatározni a pozíciót, annál pontatlanabban mérhetjük csak meg a sebességet, és viszont. Heisenberg kimutatta, hogy a részecske pozíciójában és sebessége és tömege szorzatában fellépő bizonytalanságok szorzata soha nem lehet kisebb egy bizonyos állandó mennyiségnél. Eszerint ha például sikerül felére csökkentenünk a pozíció bizonytalanságát, akkor kétszeresére nő a sebesség bizonytalansága, és viszont. A természet minden esetben rákényszerít bennünket erre a kompromisszumra.

Mennyire rossz ez a kompromisszum? Ez attól függ, mekkora az előbb említett „bizonyos állandó mennyiség”-nek a számértéke. Nos, ez a mennyiség a Planck-állandó, amely nagyon parányi szám. Olyan kicsi, hogy a kompromisszum következményei és általában a kvantumelmélet megnyilvánulásai leginkább a relativitáselmélet hatásaihoz hasonlíthatóak, legalábbis abban az értelemben, hogy a hétköznapi életben közvetlenül érzékelhetetlenek. (Mindamellet a kvantumelmélet jelentős hatással van az életünkre – például azért, mert ez jelenti a modern elektronikai eszközök működésének fizikai alapját.) Ha például egy 1 gramm tömegű pingponglabda helyét bármely irányban 1 centiméter pontossággal rögzítjük, akkor a sebességét sokkal pontosabban tudjuk meghatározni, mint amire bármikor szükségünk lehet. Ha ezzel szemben egy elektron helyét csak olyan pontosan határozzuk meg, mint amekkora annak az atomnak a kiterjedése, amelyikhez tartozik, akkor a sebességét csak 1000 kilométer/másodpercet meghaladó bizonytalansággal tudjuk megmérni, ami a legnagyobb jóindulattal sem nevezhető pontos mérésnek.

A határozatlansági elv által diktált határ nem függ attól, milyen módszerrel próbáljuk megmérni a részecske helyét vagy sebességét, mint ahogy a részecske fajtájától sem függ. Heisenberg

határozatlansági relációja a világ alapvető, kikerülhetetlen sajátossága, amelynek mélyenszántó következményei vannak egész világképünkre. Ezeket a következményeket sok filozófus még most, több mint hetven év elteltével sem érti teljes mélységében, miközben számos ellentmondás övezi az elvet. A határozatlansági elv egyszer és mindenkorra véget vetett Laplace ábrándjának, a teljességgel determinisztikus világmodellen alapuló tudományelméletnek. Magától értetődően nem lehetünk képesek pontosan megjósolni a jövő eseményeit, ha nem tudjuk pontosan feltérképezni a Világegyetem jelenlegi állapotát.

Azonban továbbra is el tudjuk képzelni, hogy létezhet a törvényeknek egy olyan rendszere, amely teljes egészében meghatározza a világban lejátszódó eseményeket, ám csakis egy olyan természetfeletti lény számára, aki annak megzavarása nélkül tudja megfigyelni a Világegyetem jelen állapotát. Az efféle világmodellek azonban nem túlságosan érdekesek, számunkra, földi halandók számára. Célszerűbbnek tűnik az Occam borotvájának nevezett gazdaságossági elvet alkalmazni, amely kizárja az elmélet összes megfigyelhetetlen tulajdonságát. Ez a megközelítés vezette el az 1920-as években Heisenberget, Erwin Schrödingert és Paul Diracot a newtoni mechanika újrafogalmazására. Newton mechanikája helyett megalkották a határozatlansági elvre épülő kvantummechanikát. Ebben az elméletben a részecskéknek nincs többé jól meghatározott helye és sebessége. Ehelyett valamilyen kvantumállapotuk van, ami a helyük és a sebességük a határozatlansági reláció keretein belül előállított valamiféle kombinációja.

A kvantummechanika egyik forradalmian újszerű tulajdonsága, hogy a megfigyelések eredményére vonatkozóan nem tesz határozott és egyértelmű előrejelzéseket. Ehelyett a mérés vagy kísérlet több lehetséges kimenetelét adja meg, majd mindegyikről megmondja, milyen valószínűséggel várható a bekövetkezése. Ha tehát nagy számú, teljesen azonos felépítésű rendszerrel, pontosan megegyező kezdeti feltételek mellett végrehajtjuk ugyanazt a mérést, akkor azt találjuk, hogy az esetek egy meghatározott részében a mérés A eredményre vezet, míg a többi esetben B-t kapjuk eredményül. Megjósolhatjuk, hogy a mérések közül körülbelül hánynak lesz A, és

hánynak B az eredménye, egy kiszemelt mérés eredményére vonatkozóan azonban semmilyen biztos kijelentést sem tehetünk.

Képzeliük el például, hogy a dartsban egy nyíllal célba dobunk. A klasszikus – vagyis a nem kvantum- – elmélet szerint a dobónyíl vagy beletalál a táblán a középső mezőbe, vagy nem. Ha ismerjük a dobónyíl sebességét, amikor eldobjuk, a gravitációs erő nagyságát, és számos egyéb, a mozgását befolyásoló tényezőt, akkor pontosan ki tudjuk számítani, hogy célba találunk-e, vagy sem. A kvantumelmélet szerint azonban ez a felfogás helytelen, mert nem állíthatunk semmit teljes bizonyossággal. A kvantumelmélet szerint bizonyos valószínűsége van annak, hogy a nyíl a középső mezőbe talál, miközben valamilyen nullánál nagyobb valószínűsége van annak, hogy a tábla valamelyik, a középsőtől különböző mezőjét találja el. Ha egy olyan nagy tárgyról van szó, mint a darts, és a klasszikus elmélet – ebben az esetben Newton törvénye – azt állítja, hogy a nyíl a középső mezőbe fog fúródni, akkor egészen bizonyosak lehetünk benne, hogy így is fog történni. Legalábbis az ellenkező esetnek olyan csekély a valószínűsége (a kvantumelmélet szerint), hogy a Világegyetem története végéig dobálhatnánk a nyíllal pontosan ugyanolyan körülmények közepette, valószínűleg még akkor sem fordulna elő egyetlenegyszer sem, hogy mellétalálnánk. Az atomi méretek világában azonban egészen más a helyzet. Ha a dartsban a dobónyíl egyetlen atomból állna, akkor 90 százalék valószínűséggel találna bele a középső mezőbe, 5 százalék valószínűséggel a tábla más pontját érné el, miközben 5 százalék lenne annak az esélye, hogy még a táblát sem találjuk el. Előre nem tudnánk megmondani, melyik eredmény következik be. Csupán abban lehetünk biztosak, hogy ha nagyon sokszor megismételjük a dobást, akkor arra számíthatunk, hogy száz dobásból kilencvenszer beletalálunk a középső mezőbe.

A kvantummechanika tehát behoz a természettudományba egy elkerülhetetlen bizonytalansági, vagy véletlenszerűségi tényezőt. Einstein nagyon határozottan e nézettel szemben foglalt állást, jöllehet ő maga is jelentős szerepet játszott e felfogás kialakulásában. Valójában a Nobel-díjat is a kvantumelmélet területén végzett alapvető munkásságáért ítelték oda neki. Mindamellett soha nem fogadta el, hogy a Világegyetemet a véletlen

irányítja. Érzéseit legtömörebben híres mondásában foglalta össze, miszerint „Isten nem kockajátékos”.

A tudományos elméletek jóságát, mint már említettük, aszerint ítéljük meg, hogy mennyire képesek megjósolni egy kísérlet eredményét. A kvantumelmélet korlátozza képességeinket. Vajon ez egyúttal azt is jelenti, hogy a kvantumelmélet a tudományt korlátozza? Ha a tudománynak fejlődnie kell, akkor művelésének módját a természetnek kell diktálnia. Ebben az esetben a természet megköveteli az előrejelzés eddig használt fogalmának újradefiniálását. Nem lehetünk képesek pontosan előre megmondani egy kísérlet eredményét, ám elegendően sokszor megismételhetjük a kísérletet, és ellenőrizhetjük, hogy a különböző eredmények valóban a kvantumelmélet által megadott valószínűségeknek megfelelő arányban fordulnak-e elő. A határozatlansági elv ellenére tehát nem kell feladnunk a fizikai törvények által irányított világba vetett hitünket. Végző soron a legtöbb tudós éppen azért volt hajlandó elfogadni a kvantummechanikát, mert jóslatai tökéletesen egybevágtak a kísérletek eredményeivel.

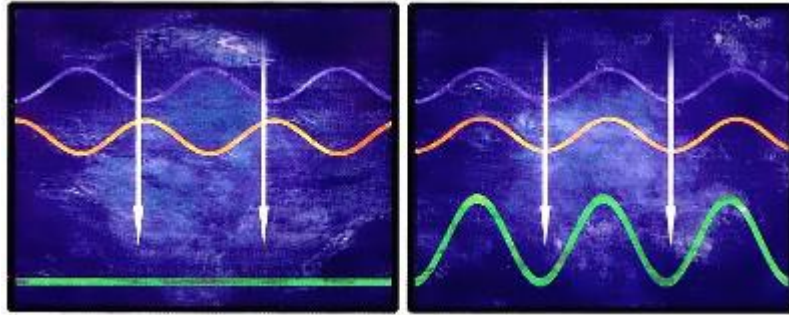
Heisenberg határozatlansági elvének egyik legfontosabb következménye szerint az elemi részecskék bizonyos értelemben hullámokként viselkednek. Mint korábban már láttuk, a részecskéknek nincs meghatározott helyük, hanem valamilyen valószínűség-eloszlásnak megfelelő módon „szétkenődnek”. Hasonlóképpen, bár a fény hullámokból áll, Planck kvantumhipotézise mégis azt állítja, hogy bizonyos értelemben úgy viselkedik, mintha részecskékből állna: ugyanis csak a kvantumoknak nevezett energiacsomagok formájában lehet kibocsátani vagy elnyelni. Valójában a kvantummechanika alapjául egy olyan, új típusú matematika szolgál, amely a valóságos világot már nem részecskék vagy hullámok együtteseként írja le. Bizonyos esetekben valóban célszerű a részecskékre mint hullámokra gondolni, míg máskor éppen ellenkezőleg, az a célravezető, ha a hullámokat részecskékből állóknak tekintjük, ám ezek a gondolkodásmódok csupán konvenciók. Erre gondolnak a fizikusok, amikor azt mondják, hogy a kvantummechanikában a hullámok és a részecskék között kettősség, dualitás áll fenn.



Elmosódott kvantumpozíció.

A kvantumelmélet szerint nem lehet egy objektum helyét és sebességét egyidejűleg végtelen pontossággal meghatározni, ennek következtében a jövő eseményeinek menete sem határozható meg előre pontosan.

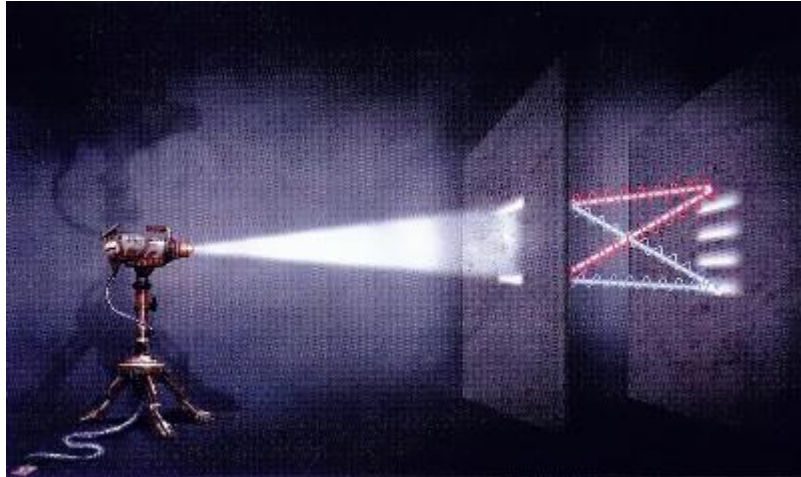
A kvantummechanikai objektumok hullámszerű viselkedésének egyik fontos következménye értelmében részecskék két csoportja között megfigyelhető az interferenciának nevezett jelenség. Normális körülmények között az interferenciát a hullámok esetén létrejövő jelenségnek tekintjük. Ha két hullám találkozik, akkor előfordulhat, hogy az egyik hullámhegyei éppen a másik hullámvölgyeivel esnek egybe. Ilyenkor a hullámokat ellentétes fázisúaknak^{*} mondjuk. Ilyenkor a két hullám kioltja egymást, ahelyett, hogy egyetlen, erősebb hullámmá egyesülnének, amint arra számítanánk. Az interferenciára jól ismert példa a szappanbuborék vékony hártáján előtűnő színek gyakran megfigyelhető kavargása. Ezt a buborékot alkotó vékony vízhártya két oldaláról visszaverődő fénysugarak okozzák. A fehér fény különböző hullámhosszú (színű) fénysugarak keveréke. Bizonyos hullámhosszak esetén a buborék egyik faláról visszaverődő fénysugár hullámhegyei éppen a másik oldalról visszaverődő fénysugár hullámvölgyeivel találkoznak, ezért kioltják egymást. Ezek a színek tehát hiányozni fognak a visszaverődő fényből, ami ennek következtében színesnek látszik.



Azonos és ellentétes fázisban.

Ha két hullám hullámhegyei és hullámvölgyei egybeesnek, akkor a hullám erősödik (jobbra), ha viszont az egyik hullámhegyei a másik hullámvölgyeivel találkoznak, akkor a két hullám kioltja egymást (balra).

Ám a kvantumelméletből azt is megtudjuk, hogy interferencia nemcsak hullámok, hanem részecskék között is létrejöhet, éppen a részecske-hullám dualizmus következtében. Híres példa erre az úgynevezett kétréses kísérlet. Képzeljünk el egy vékony válaszfalat, amelybe két, egymással párhuzamos, keskeny rést vágunk. Mielőtt megvizsgálnánk, mi történik, amikor részecskéket engedünk át a réseken, gondoljuk meg, mi történik, amikor fénysugárral hajtjuk végre a kísérletet. A válaszfal egyik oldalára tegyünk egy meghatározott színű fényforrást (amely tehát csak adott hullámhosszú fényhullámokat bocsát ki). A fény legnagyobb része persze a válaszfalba ütközik, valamennyi azonban áthalad a réseken. Felételezzük, hogy a fal túlsó oldalán az átjutó fény egy vetítőernyőre esik. A sugarakat felfogó ernyő minden pontjába mindkét résen keresztül érkeznek fényhullámok. Igen ám, de rendszerint a fénysugárnak különböző távolságot kell megtennie attól függően, hogy a fényforrástól az ernyő egy adott pontjáig az egyik vagy a másik résen keresztül vezet az útja. Mivel a megtett út különböző, a két résen keresztül beérkező hullámok nem lesznek azonos fázisban. Az ernyő bizonyos pontjaiban az egyik résen keresztül érkező hullámok hullámhegyei éppen a másik résen keresztül jövő hullámok hullámvölgyeivel találkoznak, így kioltják egymást, – másutt a hullámhegyek egybeesnek egymással, ezért ott a hullámok erősítik egymást, míg a többi helyen valamilyen köztes állapot áll elő. Ennek eredményeképpen az ernyőn sötét és világos csíkokból álló, jellegzetes mintázatot látunk.



Megtett út és interferencia.

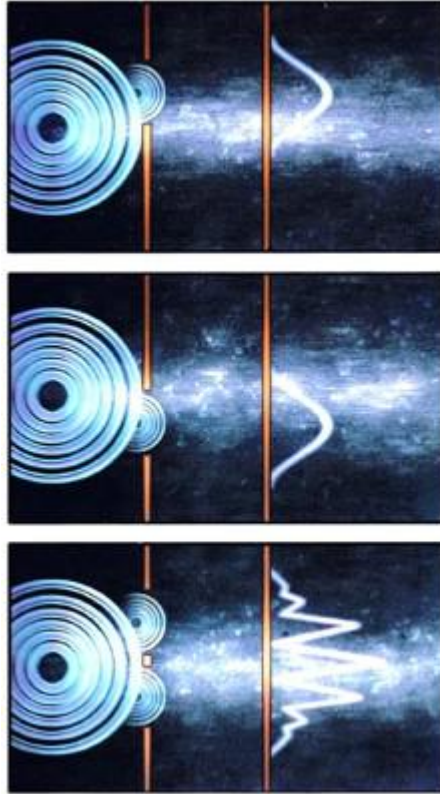
A kétréses kísérletben az alsó és a felső résen áthaladó hullámok által megtett utak közötti különbség a felfogó ernyőn mért függőleges távolsággal pontról pontra változik. Ennek eredményeképpen bizonyos magasságokban a hullámok erősítik, míg másutt kioltják egymást, vagyis úgynevezett interferenciaképet hoznak létre.

Figyelemre méltó módon pontosan ugyanilyen mintázatot kapunk eredményül, ha a fényforrás helyére valamilyen elemi részecskéket, például elektronokat adott sebességgel kibocsátó forrást helyezünk. (A kvantumelmélet szerint ha az elektronok pontosan meghatározott sebességgel mozognak, akkor a nekik megfelelő anyaghullámok is pontosan meghatározott hullámhosszúak.) Felételezzük, hogy csak az egyik rést nyitjuk ki, és így kezdjük a válaszfal felé kilőni az elektronokat. A legtöbb elektron elakad a válaszfalban, néhány azonban keresztüljut a résen, és megjelenik a másik oldalon elhelyezett ernyőn. Logikusnak tűnik feltételezni, hogy ha a másik rést is kinyitjuk, akkor egyszerűen csak nő a felfogó ernyő egyes pontjait eltaláló elektronok száma. Ezzel szemben a valóságban a második rés szabaddá tétele után az ernyő egyes pontjaiban várakozásunknak megfelelően valóban nő, más pontokban azonban csökken az odaérkező elektronok száma, mintha az elektronok nem részecskeként viselkednének, hanem hullámként interferálnának egymással.

Most képzeljük el, hogy az elektronokat egyesével küldjük át a kétréses kísérleti elrendezésen. Vajon ilyenkor is létrejön az interferencia? Józan ésszel arra gondolnánk, hogy minden egyes elektron vagy az egyik, vagy a másik résen halad át, így nem

kapnánk interferenciamintázatot. A valóságban azonban az interferenciakép még akkor is megjelenik, amikor az elektronok egyenként mennek át a réseken. Ez azt jelenti, hogy minden egyes elektron egyszerre megy át mindkét résen, majd önmagával interferál!

A részecskék közötti interferencia jelensége kritikus fontosságú, ha meg akarjuk érteni az atomok szerkezetét. Az atomokét, amelyek alapvető építőkövei minden anyagnak, amiből a környezetünk tárgyai és a saját testünk is felépül. A XX. század elején úgy gondolták, hogy az atomok felépítése leginkább a Naprendszerére hasonlít, vagyis az elektronok (a negatív elektromos töltésű részecskék) ugyanúgy keringenek a pozitív töltésű atommag körül, mint a bolygók a Nap körül. Az akkori feltételezések szerint a pozitív és a negatív elektromos töltések között fellépő vonzóerő tartotta pályán az elektronokat, ugyanúgy, ahogy a Nap és a bolygók közötti gravitációs vonzóerő gondoskodik a bolygók pályán tartásáról. Ezzel a képpel azonban az volt a baj, hogy a mechanika és az elektromosság klasszikus, vagyis kvantummechanika előtti törvényei szerint az ily módon keringő elektronnak sugárzást kellene kibocsátania. Ennek következtében folyamatosan veszítene az energiájából, ezért spirális pályán egyre közelebb kerülne az atommaghoz, míg végül belezuhanna. Ez azt jelenti, hogy minden anyag minden atomjának rövid időn belül össze kellene omlania valamilyen roppant nagy sűrűségű állapotba, ami viszont nyilvánvalóan nem történik meg!

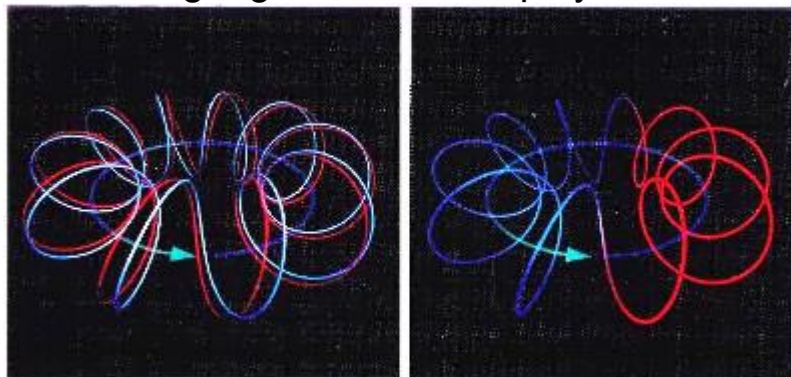


Elektronok interferenciája

Az interferencia következtében egészen más képet kapunk, ha az elektronnyalábot egyszerre engedjük keresztül két résen, mintha külön-külön bocsátanánk át az egyes réseken.

Niels Bohr dán fizikusnak 1913-ban sikerült részleges megoldást találnia erre a problémára. Arra gondolt, hogy talán az elektronok nem képesek tetszés szerinti távolságban keringeni a központi mag körül, hanem csak bizonyos, meghatározott méretű pályákat foglalhatnak el. Feltételezve, hogy minden egyes ilyen pályán csak egy vagy két elektron keringhet, sikerült megoldania az atomok összeomlásának a problémáját, mert ha a korlátozott számú belsőbb pálya már megtelt, akkor az elektronok nem közeledhetnek tovább a maghoz. Ez a modell remek magyarázatot adott a legegyszerűbb atom, a hidrogénatom szerkezetére, amelyben csak egyetlen elektron kering az atommag körül. Nem volt azonban világos, miként lehet a modellt kiterjeszteni a bonyolultabb atomokra, sőt mi több, a korlátozott számú megengedett pálya hipotézise nem látszott többnek valamiféle tüneti kezelésnél. A trükk matematikailag kétségtelenül működött, azonban senki sem tudta, miért kellene a természetnek éppen így viselkednie, illetve mi lehet az a háttérben

működő fizikai törvény – ha egyáltalán van ilyen –, amely ily módon nyilvánulna meg. Az új elmélet, a kvantummechanika viszont megoldotta ezt a problémát. Kiderült ugyanis, hogy az atommag körül keringő elektront is hullámnak lehet tekinteni, amelynek hullámhossza a sebességétől függ. Képzeljük el, hogy a hullám Bohr elgondolásának megfelelően meghatározott távolságban kering a mag körül. Bizonyos pályák kerülete éppen egész számú többszöröse lenne az elektron hullámhosszának. Ezeknél a hullámoknál a hullámhegy mindig ugyanott lenne a pálya mentén, ezért a hullámok erősítenék egymást. Nos, pontosan ezek a pályák felelnének meg a Bohr által megengedettnek. Azon pályáknál, amelyek kerülete nem egész számú többszöröse az elektron hullámhosszának, a hullámhegy az elektron keringése során előbb-utóbb hullámvölgygel találkozik, így kioltódik. Ezek a pályák nem megengedettek. Ezzel sikerült magyarázatot adni a Bohr elgondolása szerinti megengedett és tiltott pályákra.

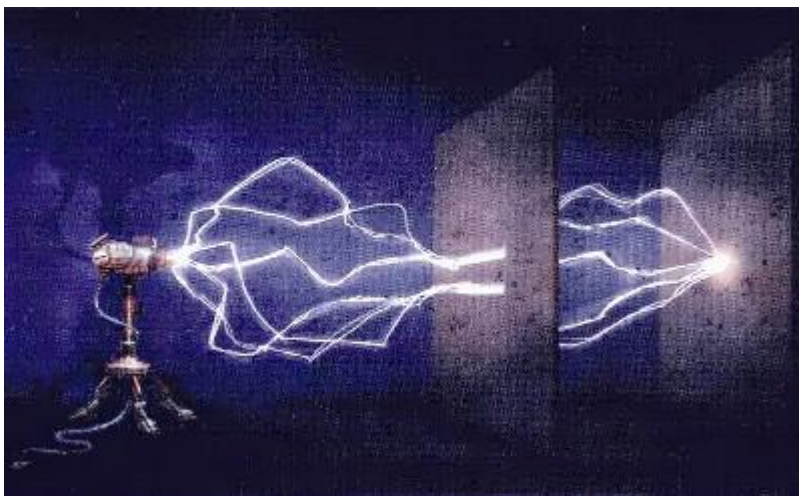


Hullámok az atompályákon.

Niels Bohr az atommagból és a körülötte vég nélkül keringő elektronhullámokból állónak képzelte az atomot. E kép értelmében csak azok a pályák létezhetnek tartósan, amelyeknél a pálya kerülete éppen egész számú többszöröse az elektron hullámhosszának, minden egyéb pályát az interferencia lerombol.

A hullám-részecske kettősség szemléltetésének egyik szép módszere a Richard Feynman amerikai fizikus által bevezetett, úgynevezett pályaintegrál-módszer (az összes lehetséges pályagörbe – „történet” – összegzésének módszere). E tárgyalásmódnál azt feltételezzük, hogy a részecskének nem egyetlen története (pályája) van a téridőben, mint ahogyan azt a klasszikus, tehát nem kvantumos fizikában várnánk, hanem a

részecske az A és a B pont között minden lehetséges útvonalat bejár. Feynman az A és B közötti minden egyes pályához hozzárendelt néhány számértéket. Ezek közül az egyik a hullám amplitúdóját, azaz nagyságát jellemzi. A másik a fázisát, vagyis azt, hogy a periodikus változáson belül éppen melyik szakaszban jár a hullámozás: hullámhegynél, hullámvölgynél vagy valahol a kettő között. A részecske A-ból B-be történő eljutásának valószínűségét akkor kapjuk meg, ha az A-t B-vel összekötő minden lehetséges pályára elvégezzük a hullámok összegzését. Általánosságban elmondható, hogy ha a szomszédos pályákat összehasonlítjuk egymással, akkor általában a hullámok fázisa jelentősen eltérő lesz. Ennek következtében az ezen pályákhoz tartozó hullámok csaknem teljes egészében kioltják egymást. A szomszédos útvonalak némely csoportján belül azonban a fázisok csak kevésbé térnek el egymástól, ezért az ezen útvonalakhoz tartozó hullámok nem oltják ki egymást. Ezek a pályák felelnek meg a Bohr-féle megengedett pályáknak.



Sokelektron-pálya.

A kvantumelmélet Richard Feynman szerinti megfogalmazásában egy részecske, például a képen látható, a forrástól a felfogó ernyőig mozgó elektron, egyszerre minden lehetséges útvonalon végighalad.

Ezeket az elgondolásokat egyértelmű matematikai formába öntve viszonylag könnyen ki lehetett számítani az összetettebb atomokban, sőt a több atomból álló molekulákban is a megengedett pályákat, jóllehet utóbbiakat a több atommag körüli pályákon keringő elektronok tartják össze. Minthogy a molekulák és egymás közötti

reakcióik jelentik minden kémiai és biológiai folyamat alapját, ezért a kvantummechanika elvben legalábbis lehetővé teszi, hogy a határozatlansági elv által szabott határokon belül lényegében minden körülöttünk történő esemény kimenetelét előre jelezzük. (A gyakorlatban azonban az egyenleteket csak a legegyszerűbb atomra, a hidrogénre tudjuk megoldani, amely egyetlen elektront tartalmaz. Az ennél bonyolultabb atomok és molekulák esetében közelítő módszereket, illetve számítógépes megoldásokat használunk.)

A kvantumelmélet rendkívül sikeresnek bizonyult, aminek köszönhetően ma már minden korszerű tudomány és technológia alapját képezi. Törvényei irányítják a tranzistorok és az integrált áramkörök működését, amelyek a televíziótól a számítógépig minden elektronikus eszköz nélkülözhetetlen alkatrészei, de a kvantumelmélet jelenti a modern kémia és biológia alapját is. A fizikai tudományok egyetlen területe, ahová még a kvantummechanikának nem sikerült behatolnia, a gravitáció és a Világegyetem nagy léptékű szerkezete. Einstein általános relativitáselméletébe, mint azt már korábban említettük, nem épül be a kvantummechanikai határozatlansági elv, pedig erre az elméletek összhangja érdekében szükség lenne.

Amint az előző fejezetben láttuk, már tudjuk, hogy az általános relativitáselmélet módosításra szorul. A végtelen sűrűségű pontok – a szingularitások – előrejelzésével a klasszikus (tehát nem kvantált) relativitáselmélet a saját sírját ásta meg, éppúgy, ahogy a klasszikus mechanika tette azzal az előrejelzéssel, hogy a feketetestnek végtelenül sok energiát kell kisugároznia, vagy hogy az atomoknak végtelen sűrűségűvé kell összeroskadniuk. Csak abban reménykedhetünk, hogy amint az a klasszikus mechanika esetében történt, a klasszikus relativitáselméletből is sikerül kiküszöbölni ezeket az elfogadhatatlan szingularitásokat az elmélet kvantumelméletté alakításával, vagyis a gravitáció kvantumelméletének megalkotásával.

De vajon ha az általános relativitáselmélet hibás, akkor miért támasztja mégis alá az összes kísérlet eredménye? Nos, azért nem találtunk eddig még egyetlen eltérést sem a megfigyelések és az általános relativitáselmélet jóslatai között, mert az általunk érzékelt

gravitációs terek mindig meglehetősen gyengék. Amint azonban már láttuk, a Világegyetem történetének kezdetekor, amikor egész anyaga egy kicsiny térfogatba volt összezsúfolva, a gravitációs térnek rendkívül erősnek kellett lennie. Ilyen erős gravitációs tér jelenlétében a kvantumelméleti hatásoknak már számottevőekké kell válniuk.

Bár egyelőre még nem áll rendelkezésünkre a gravitáció kvantumelmélete, úgy gondoljuk, számos vonását ismerjük már. Először is tartalmaznia kell Feynman elgondolását, amely szerint a kvantumelméletet a lehetséges pályákra történő összegzéssel kell megfogalmazni. Másodszor, bármely végső elméletnek tartalmaznia kell Einstein elképzelését is, amely szerint a gravitációs teret a téridő görbülete jeleníti meg, a részecskék pedig a görbült térbeli egyenes útvonalhoz legközelebb álló pályát igyekeznek követni – ám minthogy a téridő szerkezete nem sík, ezért pályájuk elgörbülni látszik, mintha a gravitációs tér görbítene el. Ha a Feynman-féle pályaintegrál-módszert a gravitáció Einstein-féle képére alkalmazzuk, akkor egyetlen részecske történetének analógiájára megkaphatjuk azt a teljes, görbült téridőt, amely az egész Világegyetem történetét mutatja be.

A klasszikus gravitációelméletben a Világegyetem csak kétféleképpen viselkedhet: vagy végtelen idő óta létezik, vagy pedig a valamilyen véges idővel ezelőtti múltban, egy szingularitás formájában meghatározott kezdete volt. Az előzőekben ismertetett okokból úgy hisszük, hogy a Világegyetem nem létezett öröktől fogva. Ha azonban volt kezdete, és tudni akarjuk, hogy az Einstein-egyenletek megoldásai közül melyik érvényes a mi Világegyetemünkre, akkor a klasszikus általános relativitáselmélet szerint ehhez ismernünk kell a kezdeti állapotát, vagyis azt, pontosan hogyan kezdődött a Világegyetem története. Talán Isten alkotta meg a természet törvényeit, de ha így történt, akkor úgy tűnik, mintha utána magára hagyta volna teremtményét, hogy ezen törvények által megszabott módon fejlődjék, miközben Ő maga nem kívánt a továbbiakban beleavatkozni a fejlődés menetébe. De vajon milyen alapon választotta meg Isten a Világegyetem kezdeti állapotát, elrendezését? Milyenek lehettek a határfeltételek az idő kezdetén? A klasszikus általános relativitáselméletben ez komoly

problémát jelent, mert a klasszikus általános relativitáselmélet csődöt mond, amikor a Világegyetem kezdetét kellene leírnia.

A gravitáció kvantumelméletében viszont új lehetőség merül fel, amellyel orvosolható ez a probléma. A kvantumelméletben lehetőség van arra, hogy a téridő véges kiterjedésű legyen, mégse forduljanak elő benne határfelület vagy él formájában megjelenő szingularitások. A téridő olyan szerkezetű lenne, mint a Föld felszíne, csak éppen kettővel több dimenzióban. Amint korábban már rámutattunk, ha a Föld felszínén azonos irányban utazunk, akkor soha nem találjuk szembe magunkat valamilyen áthatolhatatlan fallal, és nem esünk le a peremén, hanem végül visszaérkezünk oda, ahonnan elindultunk, mégsem futunk bele útközben sehol sem egy szingularitásba. Ha tehát kiderül, hogy ez a helyzet, akkor a gravitáció kvantumelmélete új lehetőséget kínál a világ leírására, anélkül, hogy szingularitásoknak kellene előfordulniuk, ahol a tudomány működése csődöt mond.

Ha viszont nincs határa a téridőnek, akkor azzal sem kell foglalkoznunk, hogyan viselkedik a határfelületen – vagyis a Világegyetem kezdeti állapotát sem kell ismernünk. Nem létezik tehát a téridőnek olyan széle, ahol Isten közbeavatkozásának feltételezésére hajlanánk, vagy ahol valamilyen új törvényre lenne szükség a téridő határfeltételeinek a megadásához. Egyszerűen kijelenthetnénk, hogy „a Világegyetem határfeltétele az, hogy nincs határa”. A Világegyetem teljes mértékben tartalmazná önmagát, és nem állna semmiféle kívülről jövő hatás befolyása alatt. Nem teremtné, mint ahogy el sem pusztulna. Egyszerűen csak LÉTEZNE. Mióta úgy gondoljuk, hogy a Világegyetem történetének volt kezdete, azóta elég nyilvánvalónak tűnt a Teremtő szerepe. Ám ha a Világegyetem valóban teljes mértékben önmagában zárt, nincs határa vagy pereme, nincs kezdete és nincs vége, akkor már nem olyan nyilvánvaló a válasz arra a kérdésre, hogy mi lehet a Teremtő szerepe.

TIZEDIK FEJEZET

Féreglyukak és időutazás

Az előző fejezetekben láttuk, miként változott az idő természetéről alkotott képünk az évek során. A XX. század kezdetéig az emberek hittek az abszolút időben. Eszerint minden eseményhez egyedi módon hozzá lehetne rendelni egy „idő”-nek nevezett számot, továbbá minden megfelelően működő óra azonos időtartamot mérne két esemény időbeli távolságára. Amikor azonban felfedezték, hogy a fény sebessége minden megfigyelő számára azonos, függetlenül a megfigyelők mozgásától, és megszületett a relativitáselmélet, akkor el kellett vetni az abszolút idő egykori fogalmát. Az események időpontja tehát nem állapítható meg abszolút érvénnyel. Ehelyett minden megfigyelő számára a saját tempójában múlik az idő, amit a magával vitt órával tud mérni. A különböző megfigyelők órái nem szükségszerűen mutatják ugyanazt az időt. Az idő tehát sokkal személyhez kötöttebb fogalommá vált, ami ahhoz a megfigyelőhöz kapcsolódik, aki a mérését végzi. Ennek ellenére az időt úgy tekintették, mint egy hosszú, egyenes vasúti pályát, amelyen csak vagy az egyik, vagy a másik irányban lehet közlekedni. Mi történne azonban akkor, ha a vasútvonalon hurkok és elágazások volnának, aminek következtében a mindig előre felé haladó vonat visszaérkezhetne egy olyan állomásra, amelyiken korábban már járt? Más szavakkal: vajon lehetséges lenne, hogy valaki elutazzék a múltba vagy a jövőbe? H. G. Wells Az időgép című írásában megvizsgálta ezeket a lehetőségeket, akárcsak később számos további tudományos-fantasztikus író. Mint tudjuk, számtalan, a sci-fi világában született ötlet, mint például a tengeralattjáró vagy a holdutazás, később megvalósult és tudományos tényné vált. Melyek hát az időutazás lehetőségei?

A jövőbe el lehet utazni. A relativitáselmélet megengedi olyan időgép készítését, amellyel előreugorhatunk az időben. Belépünk az időgépbe, várunk egy darabig, majd kiszállunk belőle, és megállapítjuk, hogy a Földön sokkal hosszabb idő telt el, mint a mi számunkra. Az ehhez szükséges technológia ugyan ma még nem áll a rendelkezésünkre, ám ez csak műszaki kérdés, abban mindenestre bizonyosak vagyunk, hogy nincs elvi akadálya a megépítésének. Az ilyen időgép építésének egyik módja, ha kihasználjuk a 6. fejezetben az ikerparadoxon kapcsán leírt jelenséget. Eszerint, mialatt az időgépben ülünk, az elindul, a

fénysebesség közelébe felgyorsul, majd ezzel a sebességgel utazik egy darabig (attól függ, mennyit, hogy milyen messzire akarunk előreutazni az időben), majd visszatér a Földre. Talán senkit sem lep meg, hogy az időgép nem más, mint űrhajó, hiszen a relativitáselmélet értelmében a tér és az idő szorosan összefügg egymással. Akárhogy is nézzük, ami minket illet, az egyetlen „hely”, ahol az egész folyamat alatt tartózkodtunk, az időgép belseje. Amikor pedig kiszállunk, azt tapasztaljuk, hogy a Földön hosszabb idő telt el, mint amennyit mi az űrhajóban átéltünk. Tehát eljutottunk a jövőbe. De vajon vissza is tudunk menni? Megteremthetőek-e az időben visszafelé utazás feltételei is?



Időgép.

A szerzők egy időgépben.

Az első jelzés, miszerint a fizika törvényei valóban megengedhetik az időben visszafelé utazást, 1949-ből származik, amikor Kurt Gödel az Einstein-egyenletek egy új megoldását fedezte fel, nevezetesen egy új, az általános relativitáselmélet által megengedett téridőt. A Világegyetem sok különböző matematikai modellje kielégíti az Einstein-egyenleteket, ez azonban nem feltétlenül azt jelenti, hogy mindegyik megfeleltethető annak a

Világegyetemnek, amelyben élünk. A megoldások például kezdeti vagy határfeltételeiket tekintve különbözhetnek egymástól. Ellenőriznünk kell az egyes modellek fizikai jóslatait, hogy eldönthessük, megfelelnek-e a mi Világegyetemünknek, vagy sem. Gödel matematikus volt, aki annak bebizonyításával szerzett magának hírnevet, hogy lehetetlen minden igaz állítást bebizonyítani, még akkor is, ha csak az olyan lerágott csontnak számító területekre szorítkozunk, mint az aritmetika. Akárcsak a határozatlansági elv, Gödel nemteljességi tétele is alapvető korlátozást jelent a Világegyetem megértésében és eseményei előrejelzésében. Gödel akkor szerzett tudomást az általános relativitáselméletről, amikor Einsteinnel együtt életük második felében Princetonban az Institute for Advanced Study munkatársai voltak. A Gödel-féle téridőnek az a különleges tulajdonsága, hogy eszerint az egész Világegyetem forog.

Mit jelent az az állítás, hogy az egész Világegyetem forog? A forgás azt jelenti, hogy valami körbe-körbe mozog, de vajon nem következik ebből, hogy léteznie kell egy nyugalomban lévő vonatkoztatási pontnak? Megkérdezhetjük például, hogy „forog, de mihez képest?”. A válasz kissé technikai jellegű, de lényegében azt mondja ki, hogy a távoli anyag forog azokhoz az irányokhoz képest, amelyeket a Világegyetemen belül elhelyezett kicsiny pörgettyűk vagy giroszkópok kijelölnek. A Gödel-féle téridőben ennek matematikai mellékterméke az a tény, amely szerint ha nagyon messzire távolodunk el a Földtől, majd visszatérünk, akkor lehetséges hamarabb visszaérkezni, mint amikor elindultunk.

Einstein valóban csalódottságot érzett, amikor megtudta, hogy az egyenletei megengedik ezt, ő ugyanis azt hitte, hogy az általános relativitáselmélet nem engedi meg az időutazást. Bár a Gödel által talált megoldás kielégíti az Einstein-egyenleteket, azonban mégsem felel meg annak a Világegyetemnek, amelyben élünk, mert megfigyeléseink szerint a Világegyetem egésze nem forog, vagy legalábbis észrevehető mértékben nem. Ezenkívül Gödel világegyeteme nem tágul, a miénk viszont igen. Azóta azonban az Einstein-egyenleteket tanulmányozó kutatók további olyan, az általános relativitáselmélet által megengedett téridőket találtak, amelyek lehetővé teszik az időutazást a múltba. Ugyanakkor viszont

a mikrohullámú háttérsugárzás valamint a hidrogén és a hélium Világegyetemben mérhető arányának a megfigyeléséből arra következtetünk, hogy a Világegyetemnek ősi állapotában nem lehetett akkora a görbülete, mint amekkorát az időutazás létrejöttéhez ezek a modellek megkövetelnek. Ugyanerre a következtetésre juthatunk elméleti alapokon is, feltéve, hogy a határ nélküli elképzelés^{*} helyesnek bizonyul. A kérdés tehát a következő: ha már a Világegyetem kiinduló állapotában nem volt jelen az időutazás megvalósításához szükséges térgörbület, akkor vajon mi magunk létrehozhatjuk-e ezt a görbületet, azaz lokálisan meg tudjuk-e annyira növelni a téridő egy tartományának a görbületét, hogy ott mégiscsak végrehajtható legyen az időutazás a múltba.

Minthogy a tér és az idő szorosan összefügg egymással, nyilván nem lepődnek meg, hogy az időben visszafelé utazás lehetősége szoros kapcsolatban van a fénysebességnél gyorsabb utazás kérdésével. Könnyen belátható, hogy az időutazásból következik a félynél gyorsabb mozgás: ha utazásunk utolsó szakaszán visszafelé haladunk az időben, akkor az egész utat tetszőlegesen rövid idő alatt tehetjük meg – vagyis korlátlan sebességgel száguldhatunk. Ám amint látni fogjuk, ez az ellenkező irányban is működik: ha korlátlanul nagy sebességgel utazhatunk, akkor egyúttal képesek vagyunk az időben visszafelé utazásra is. Az egyik nem lehetséges a másik nélkül.

A fénysebességnél gyorsabb utazás kérdésével különösen sokat foglalkoznak a tudományos-fantasztikus írók. Számukra elsősorban az jelenti a problémát, hogy ha elküldenénk egy űrhajót a hozzánk legközelebbi csillaghoz, a mintegy négy fényév távolságban lévő Proxima Centaurihoz, akkor a relativitáselmélet értelmében legalább nyolc évet kell várnunk, mire az űrutazók visszatérnek és beszámolnak élményeikről. Ha pedig az expedíció úti célja a Tejútrendszer középponti vidéke lenne, akkor legalább százezer évet kellene várni a visszatérésükre. Nem túl kellemes helyzet, ha mondjuk az intergalaktikus háborúskodásról akarnánk regényt írni! A relativitáselmélet azonban nyitva hagy egy kiskaput, amelyhez ezúttal is a 6. fejezetben már tárgyalt ikerparadoxon gondolatmenetét követve juthatunk el: az űrutazók számára az utazás időtartama sokkal rövidebbnek tűnhet, mint a Földön

maradók számára. Azonban nem sok örömet jelentene néhány évet öregedve visszaérkezni a Földre, és azt látni, mindenki, akit itt hagytunk, már évezredekkel ezelőtt meghalt. Ha tehát a sci-fi írók azt akarják, hogy az olvasók érdekesnek találják történeteiket, akkor feltételezniük kell, hogy egyszer majd csak megfejtjük a fénysebességnél gyorsabb utazás titkát. Úgy tűnik, e szerzők legtöbbször nem ismerte fel, hogy ha a fénysebességnél gyorsabban utazunk, akkor a relativitáselmélet következményeképpen szükségszerűen visszafelé utazunk az időben, amint azt az alábbi limerick találóan kifejezi:

*Egy lány, ki Wightban éldegél
Gyorsabban jár, mint a fény
Ha egy nap elindul ő
Relatív az útidő
Mert előző nap célba ér*

(Kempelen Ákos fordítása)

Ennek az összefüggésnek a kulcsa az, hogy a relativitáselmélet nemcsak azt mondja ki, hogy nincs az időnek olyan egyértelmű mértéke, amelyet minden megfigyelő elfogadna, hanem azt is, hogy bizonyos körülmények között az egyes megfigyelőknek még az események megfigyelt sorrendjét illetően sem kell feltétlenül azonos eredményre jutniuk. Ha például két esemény, A és B, olyan távol van egymástól a térben, hogy egy űrhajó csak a fénysebességnél gyorsabban mozogva tudna A-ból B-be érkezni, akkor két, különböző sebességgel mozgó megfigyelő közül az egyik az A eseményt látná előbb bekövetkezni, míg a másik szerint a B esemény előzné meg időben az A eseményt. Feltételezzük például, hogy az A esemény a 2012-es olimpiai játékok 100 méteres síkfutás döntője, a B esemény pedig a Proxima Centauri világkongresszusa 100004. ülészakának megnyitása. Tegyük fel továbbá, hogy a földi megfigyelők számára az A esemény következett be előbb, és csak ezt követően történt a B esemény. Tegyük fel, hogy a B esemény a földi időszámításunk szerint 2013-ban történt. Minthogy a Föld és a Proxima Centauri távolsága körülbelül négy fényév, a két esemény eleget tesz a fentebb megfogalmazott feltételnek: jóllehet A előbb történt, mint B, mégis, ha A-ból oda akarunk érni B-be, akkor a fénysebességnél gyorsabban kell utaznunk. A Proxima Centauri

környékén tartózkodó és közel fénysebességgel a Földtől távolodó megfigyelő számára viszont úgy tűnik, mintha az események fordított sorrendben történnének: ő a B eseményt az A-nál hamarabb látja bekövetkezni. Ez a megfigyelő azt gondolná, hogy ha képesek vagyunk a fénysebességnél gyorsabban utazni, akkor a B eseményről még odaérnénk az A eseményre. Valójában, ha tényleg elég gyorsak lennénk, akkor az A esemény után még odaérhetnénk a Proxima Centaurira, még mielőtt a verseny elkezdődne, ahol biztos információink birtokában előnyös fogadást köthetnénk a győztes személyére!

Van azonban egy probléma a fénysebesség mint határsebesség átlépésével. A relativitáselmélet kimondja, hogy minél közelebb járunk a fénysebességhez, annál nagyobb teljesítményű rakétára van szükség űrhajónk további gyorsításához. Erre kísérleti bizonyítékok is rendelkezésre állnak, ha nem is űrhajókkal, hanem elemi részecskékkel, amelyeket különböző részecskegyorsítókban*, például a svájci CERN (Centre Européen pour la Recherche Nucléaire – a nukleáris kutatások európai központja) vagy az egyesült államokbeli Fermilab laboratóriumban próbálnak igen nagy sebességre gyorsítani. A részecskéket akár a fénysebesség 99,99 százalékára is lehet gyorsítani, ezután azonban hiába táplálunk a rendszerbe akármekkora gyorsító teljesítményt, mégsem tudjuk a fénysebesség határát átlépni. Hasonló lenne a helyzet az űrhajók esetében is: teljesen mindegy, milyen nagy lenne a hajtóművek teljesítménye, soha nem tudnák az űrhajót a fényénél nagyobb sebességre gyorsítani. Márpedig az időben visszafelé haladást csakis a fénysebességnél gyorsabb utazás teszi lehetővé, ezért úgy tűnik, hogy mindkét lehetőséget ki kell zárunk.

Azonban ezúttal is látszik egy kiskapu. Elképzelhető, hogy valamiképpen meg tudjuk görbíteni a téridőt, és így rövidebb átjáró keletkezik A és B között. Az egyik lehetőség, ha A és B között úgynevezett féreglyukat* hozunk létre. Amint a neve is jelzi, a féreglyuk vékony cső a téridőben, amely össze tudja kötni a téridő két, egymástól távoli, egyaránt közel sík szerkezetű tartományát. Olyan ez, mintha egy hosszú és magas hegylánc lábánál állnánk. Ha át akarunk jutni a hegy túlsó oldalára, általában nincs mit tenni, hosszú és fáradságos úton fel kell másznunk az egyik oldalon, majd

leereszkedni a másikon – hacsak nincs a sziklába vájva egy vízszintesen haladó, óriási féreglyuk. Elképzelhető, hogy mi magunk létrehozunk, vagy esetleg találunk egy olyan féreglyukat, amelyik a Naprendszer környékéről közvetlenül elvezet a Proxima Centauri térségébe. A féreglyukon keresztül a távolság esetleg mindössze néhány millió kilométer, jóllehet a közönséges térben a két égitest távolsága mintegy negyvenbillió kilométer. Ha a százméteres síkfutás döntőjének eredményét a féreglyukon keresztül tudjuk továbbítani, akkor rengeteg idő állna rendelkezésre, hogy még a kongresszus megnyitása előtt értesüljünk a verseny kimeneteléről. Ugyanígy az is előfordulhat, hogy egy, a Föld felé jövő megfigyelő talál egy másik féreglyukat, amelyiken keresztül a kongresszus megnyitója után elindulva még ideérne az olimpiai döntőre. Ezek szerint tehát a féreglyukak ugyanúgy lehetővé tennék a múltba visszautazást, mint a fénysebességnél gyorsabb mozgás.



Féreglyuk.

Ha valóban léteznek féreglyukak, akkor rövid összeköttetést létesíthetnek a tér távoli részei között.

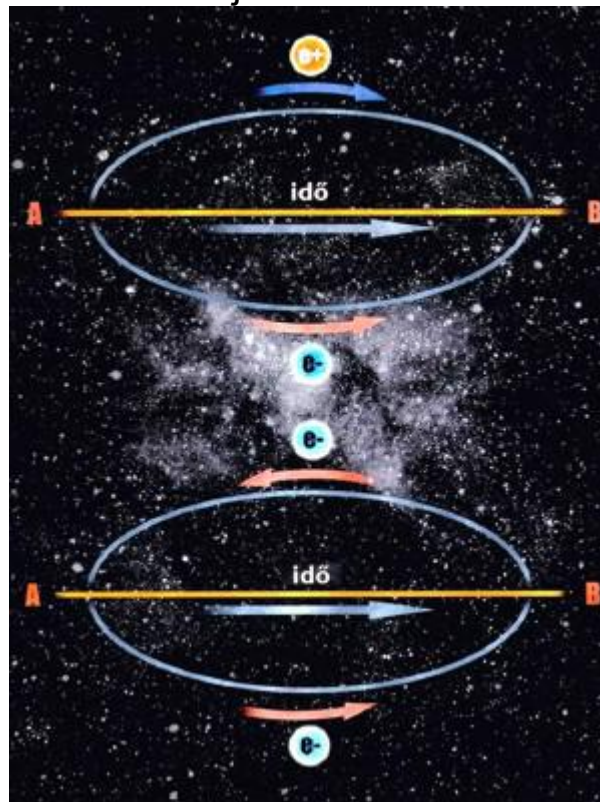
A téridő különböző, távoli tartományait összekötő féreglyukak ötlete nem a sci-fi írók képzeletének szüleménye, hanem igen tiszteletreméltó forrásból származik. Einstein és Nathan Rosen 1935-ben kimutatta, hogy az általános relativitáselmélet megengedi az általuk hidaknak^{*}, ma már inkább féreglyukaknak nevezett képződmények létezését. Az Einstein-Rosen-hidak azonban nem lennének elegendően tartós képződmények, így egy űrhajó nem tudna keresztüljutni rajtuk: a féreglyuk lecsípődne, az űrhajó pedig belefutna egy szingularitásba. Felvetődött azonban, hogy egy fejlett civilizáció képes lehet a féreglyukakat nyitva tartani. Ehhez, vagy a

téridő szerkezetének bármilyen más, az időutazást lehetővé tevő torzításához olyan tartományra van szükségünk a téridőben, ahol a görbület negatív, vagyis olyan, mint egy nyeregfelület. A közönséges, pozitív energiasűrűségű anyag mindig pozitív görbületet hoz létre a téridőben, vagyis a szerkezete olyan, mint mondjuk egy gömb felülete. A téridő szerkezetének a múltba utazást lehetővé tevő módosításához tehát negatív energiasűrűségű anyagra van szükség.

De mit jelent egyáltalán a negatív energiasűrűség? Az energia egy kicsit olyan, mint a pénz: ha az egyenlegünk pozitív, akkor az energiát sokféleképpen szétoszthatjuk, az egy évszázaddal ezelőtti klasszikus felfogás szerint azonban nincs lehetőség számlánk egyenlegének a túllépésére. Ezek a klasszikus törvények tehát egyértelműen kizárták a negatív energiasűrűség létezését, és ennek megfelelően a múltba történő időutazás lehetőségét is. Amint azonban az előző fejezetekben már elmondtuk, ezen klasszikus törvények helyét a kvantummechanikának a határozatlansági elven alapuló törvényei vették át. A kvantumelmélet törvényei sokkal liberálisabbak, és egy vagy két alszámla esetében megengedik a hiteltúllépést, feltéve, hogy a teljes egyenleg azért pozitív marad. Más szavakkal, a kvantumelmélet megengedi egyes helyeken a negatív energiasűrűséget, cserébe azonban másutt pozitívnak kell lennie az energiasűrűségnek, olyannyira, hogy a teljes energiaegyenleg is pozitív legyen. Tehát, joggal hihetjük hogy a téridő szerkezetében előfordulhatnak az időutazáshoz szükséges görbületek, illetve, hogy ezek valamilyen módon szándékosan létrehozhatóak.

A Feynman-féle pályaintegrál-módszer értelmében a múltba történő időutazás az egyedi elemi részecskék szintjén bizonyos értelemben ténylegesen meg is valósul. Feynman módszere szerint a közönséges részecske mozgása előre felé az időben egyenértékű az antirészecske időben visszafelé történő mozgásával. Matematikai megfogalmazása szerint az egyszerre keletkező részecske-antirészecske párt, amelyek később egymást annihilálják, úgy lehet tekinteni, mint egy, a téridőben zárt hurok mentén mozgó, egyetlen részecskét. Ennek szemléltetése érdekében először képzeljük el a folyamatot a hagyományos módon. Egy bizonyos időpontban –

legyen ez mondjuk A – egy részecske-antirészecske pár keletkezik. Mindkettő előre felé mozog az időben. Egy későbbi, mondjuk B időpontban a két részecske ismét kölcsönhatásba lép egymással, aminek eredményeképpen annihilálódnak. A előtt és B után egyik részecske sem létezik. Feynman szerint azonban egészen másképpen kell szemlélnünk ezt az eseménysort. Az A időpontban egyetlen részecske keletkezik. Ez B-ig előre felé mozog az időben, majd visszafordul (az időben) A felé. Az időben előre felé együtt haladó részecske és antirészecske helyett tehát csak egyetlen objektum létezik, amelyik az A és B közötti hurok mentén az időben előre és vissza mozog. Amikor az objektum az időben előre felé halad (A-tól B-ig), akkor részecskének nevezzük. Amikor viszont az időben visszafelé mozog (B-től A-ig), akkor az időben előre felé haladó antirészecskeként észleljük.



Antirészecske Feynman módra.

Az antirészecskét az időben visszafelé haladó részecskének tekinthetjük. Ezért a virtuális részecske-antirészecske^{} párt egy a téridőben zárt hurok mentén mozgó részecskéként képzelhetjük el.*

Az ilyen időutazásnak megfigyelhető hatásai vannak. Feltételezzük, például, hogy egy részecske-antirészecske pár egyik

tagja (mondjuk az antirészecske) belezuhan egy fekete lyukba, magára hagyva párját, így nincs meg az a részecske, amelyikkel az annihilálódni tudna. A cserbenhagyott részecske ugyancsak beleeshet a fekete lyukba, ám az is megtörténhet, hogy sikerül elszöknie a fekete lyuk környezetéből. Utóbbi esetben egy távoli megfigyelő számára mindez úgy tűnik, mintha a fekete lyuk egy részecskét bocsátott volna ki. A fekete lyukak sugárzását persze más, de az előbbivel egyenértékű módon is megmagyarázhatjuk. A pár fekete lyukba zuhanó tagját (mondjuk az antirészecskét) úgy is tekinthetjük, mint egy, a fekete lyukból kijövő, az időben visszafelé haladó részecskét. Amikor elérkezik abba a pontba, ahol a részecske-antirészecske pár együtt jelenik meg, szóródik a fekete lyuk gravitációs terében, mégpedig oly módon, hogy az időben előre felé haladó, és a fekete lyukból kiszabaduló részecskeként folytatja az útját. Ha viszont a párnak a részecske tagja esett bele a fekete lyukba, akkor azt az időben visszafelé haladó, és a fekete lyukból kijövő antirészecskéknek tekinthetjük. A fekete lyukak sugárzása tehát azt bizonyítja, hogy a kvantumelmélet mikroszkopikus léptékben megengedi a visszafelé történő időutazást.

Feltehetjük tehát a kérdést, hogy ha a kvantumelmélet megengedi ezt a lehetőséget, akkor majd a tudomány és a technika fejlődésével elérkezünk-e egyszer odáig, hogy végül meg tudunk építeni egy valódi időgépet. Első pillanatban ez lehetségesnek látszik. A Feynman-féle pályaintegrálnak a feltételezések szerint az összes lehetséges pályára, történetre ki kell terjednie. Eszerint tehát tartalmaznia kell azokat a történeteket is, amelyekben a téridő olyannyira görbült volt, hogy az lehetővé tette a múltba irányuló időutazást. És bár a fizika jelenleg ismert törvényei nem látszanak kizárni az időutazás lehetőségét, vannak más megfontolások, amelyek határozottan megkérdőjelezzik ezt.

Az egyik kérdés értelmében, ha lehetséges a múltba történő időutazás, akkor miért nem jött eddig még el senki sem a jövőből bennünket meglátogatni, és elmondani, miképpen is kell ezt megvalósítani? Több okot is fel lehetne sorolni, miért nem lenne bölcs dolog elárulni nekünk a jelenlegi, meglehetősen primitív fejlettségi szintünk mellett az időutazás titkát. Mindenesetre ha az

emberi természet nem változik meg gyökeresen, akkor nehéz elhinni, hogy egy a jövőből érkező látogató ne kotyogná ki a titkot. Természetesen egyesek azt állítják, hogy az ufók megpillantása jelentené a bizonyítékot arra, hogy akár az idegenek, akár a jövőből érkező látogatók felkeresnek bennünket. (Figyelembe véve a csillagok roppant távolságát, ha az idegenek ésszerű idő alatt ide akarnának érní, akkor mindenképpen a fénysebességnél gyorsabban kellene utazniuk, vagyis a két lehetőség egyenértékű.) A jövőből érkező látogatók hiányára épkezláb magyarázatot jelentene, ha azt mondanánk, hogy a múlt megváltoztathatatlan, mert azt már megfigyeltük, és nyomát sem láttuk benne a téridő olyan görbületének, ami lehetővé tenné az időutazást. Másrészt viszont a jövő ismeretlen és nyitott, tehát nyugodtan előfordulhat a szükséges görbület. Ez azt jelentené, hogy minden időutazás a jövő meglátogatására szorítkozna. Tehát semmi esély sem lenne arra, hogy Kirk kapitány és az Enterprise csillaghajó egyszerre csak felbukkanjon a jelenben.

Ez magyarázatot adhatna arra, miért nem özönlöttek el bennünket a jövőből érkező turisták, ám nem kerülhetnénk ki egy másik típusú problémát, amelyik akkor jelentkezne, ha lehetőségünk lenne visszamenni a múltba és megváltoztatni a történelem menetét. Ez a probléma így fogalmazható meg: miért nem kerülünk ellentmondásba a történelemmel? Feltételezzük, például, hogy valaki visszament a múltba és átadta a nácioknak az atombomba titkát, vagy valaki visszament a múltba és meggyilkolta saját ük-ükapját, még mielőtt annak gyermekei lettek volna. Ennek a paradoxonnak számtalan változata létezik, ám lényegében mind egyenértékűek: bármely változat szerint ellentmondásra jutnánk, ha szabadon megváltoztathatnánk a múltat.

Az időutazás által megjelenített paradoxon megoldására két lehetőség kínálkozik. Az elsőt konzisztens történelmi megközelítésnek nevezhetnénk. Ennek értelmében, még ha a téridő meg is görbült oly módon, ami lehetővé teszi az időutazást a múltba, a téridőben történő eseményeknek akkor is a fizika törvényeinek konzisztens megoldását kell adniuk. Más szavakkal, e felfogás szerint nem mehetünk vissza az időben, kivéve, ha a történelem tanúsága szerint visszamentünk, és mialatt ott vagyunk a múltban,

nem öltük meg a saját ük-ükapánkat, vagy nem követtünk el semmi olyasmit, ami ellentmondana annak a történelemnek, amely elvezetett jelenlegi helyzetünkhöz. Sőt, ha visszamennénk, nem lennénk képesek megváltoztatni a feljegyzett történelmet, csupán követhetnénk azt. E felfogás szerint a múlt és a jövő eleve elrendelt: nem létezne tehát a szabad akarat, amelynek révén szabadon eldönthetnénk, mit akarunk tenni.

Természetesen azt is mondhatjuk, hogy a szabad akarat mindenképpen csak illúzió. Ha valóban létezik a fizika teljes, a Világegyetem minden jelenségét leíró elmélete, akkor az feltételezhetően a mi cselekedeteinket is megszabja. Ezt azonban oly módon teszi, hogy egy az emberi lényekhez hasonlóan bonyolult szervezet esetében lehetetlen kiszámítani minden részletet, ezért a kvantummechanikai hatásoknak köszönhetően az események láncolata mégiscsak tartalmaz valamilyen véletlen elemet. Tehát úgy is fogalmazhatunk, hogy az embernek azért van szabad akarata, mert nem vagyunk képesek előre kiszámítani, mit fog tenni. Ha viszont egy emberi lény felszáll egy űrhajóra, és hamarabb visszaérkezik, mint ahogy elindult, akkor minden cselekedetét pontosan előre fogjuk tudni jelezni, hiszen addigra az már a feljegyzett történelem részét fogja alkotni. Ebben a helyzetben tehát az időutazó semmilyen értelemben sem rendelkezne szabad akaráttal.

Az időutazás paradoxonjának másik feloldását az alternatív történelmek hipotézisének nevezhetjük. Ennek az az elképzelés az alapja, mely szerint amikor az időutazók visszamennek a múltba, akkor valamilyen, a feljegyzett történelemtől eltérő, alternatív történelembe kerülnek. Ennek megfelelően szabadon tehetnek, amit jónak látnak, anélkül, hogy a korábbi múltjukkal való összhang követelménye bármiféle korlátot jelentene számukra. Steven Spielberg játszott el ezzel a gondolattal a Vissza a jövőbe című filmtrilógiájában: Marty McFly képes volt visszamenni a múltba, ahol kedvezőbbé alakította szülei kapcsolatának kezdetét.

Az alternatív történelmek hipotézise bizonyos mértékig úgy hangzik, mint a kvantumelmélet Feynman-féle, a lehetséges pályák összegzésével operáló értelmezése, amelyet a 9. fejezetben mutattunk be. Utóbbi szerint ugyanis a Világegyetemnek nemcsak

egyetlen történelme lenne, hanem minden lehetséges történelme létezne, természetesen mindegyik a neki megfelelő valószínűséggel. Úgy tűnik, van azonban egy lényeges különbség Feynman javaslata és az alternatív történelmek között. Feynman pályaintegráljában minden egyes pálya magában foglalja a teljes téridőt, és mindent, amit az tartalmaz. A téridő esetleg olyannyira görbült is lehet, hogy az lehetővé teszi egy rakétával a múltba utazást. A rakéta azonban ugyanabban a téridőben, és ennek megfelelően ugyanazon történelemben maradna, amelynek emiatt önmagával összhangban állónak kellene maradnia. Eszerint tehát Feynman pályaintegrálos javaslata inkább a konzisztens történelmek hipotézisét látszik támogatni, mintsem az alternatív történelmek elképzelését.

Azonban elkerülhetjük ezeket a problémákat, ha elfogadjuk azt, amit a kronológia védelme sejtésének nevezhetünk. Eszerint a fizika törvényei összejátszanak egymással annak megelőzése érdekében, hogy a makroszkopikus testek információt szállítsanak a múltba. Ezt a sejtést eddig nem sikerült bizonyítani, azonban jó okunk van feltételezni, hogy igaz lehet. Azért, mert amikor a téridő eléggé felgyűrődik, és így lehetővé teszi az időutazást a múltba, akkor a kvantumelméleten alapuló számítások azt mutatják, hogy a zárt hurkokon körbe-körbe rohangáló részecske-antirészecske párok elég nagy energiasűrűséget hozhatnak létre ahhoz, hogy az a téridőnek pozitív görbületet adjon, így lerontva a gyűrődés időutazást lehetővé tevő hatását. Minthogy egyelőre nem világos, hogy ez valóban így van-e, vagy sem, az időutazás kérdése egyelőre még nyitva marad. De azért ne kössünk rá fogadást. Ellenfelünknek meglehet az a tisztességtelen előnye, hogy ismeri a jövőt.

TIZENEGYEDIK FEJEZET

A természet erői és a fizika egyesítése

Amint a 3. fejezetben kifejtettük, nagyon nehéz lenne egyetlen nekirugaszkodással megalkotni azt a teljes, egyesített elméletet, amely a Világegyetemben mindent leír. Ezzel szemben jelentős előrehaladást sikerült elérni bizonyos részelméletek megalkotásában, amelyek csak az események korlátozott körének leírására alkalmasak, miközben más hatásokat figyelmen kívül

hagynak, vagy valamilyen számértékekkel közelítenek. A természettudomány törvényei – legalábbis mai ismereteink szerint – sok számértéket tartalmaznak: például az elektron elektromos töltésének a nagyságát, vagy a proton és az elektron tömegének arányát. Ezeknek az állandóknak az értékét jelenleg legalábbis nem tudjuk az elméleteink alapján megjósolni. Ezeket megfigyelésekből kell levezetni, majd a kapott értékeket beírjuk az egyenleteinkbe. Ezért ezeket a számokat egyesek alapvető (fizikai) állandóknak nevezik, míg mások inkább a tudatlanságunk számlájára írható tapasztalati (empirikus) tényezőkről beszélnek.

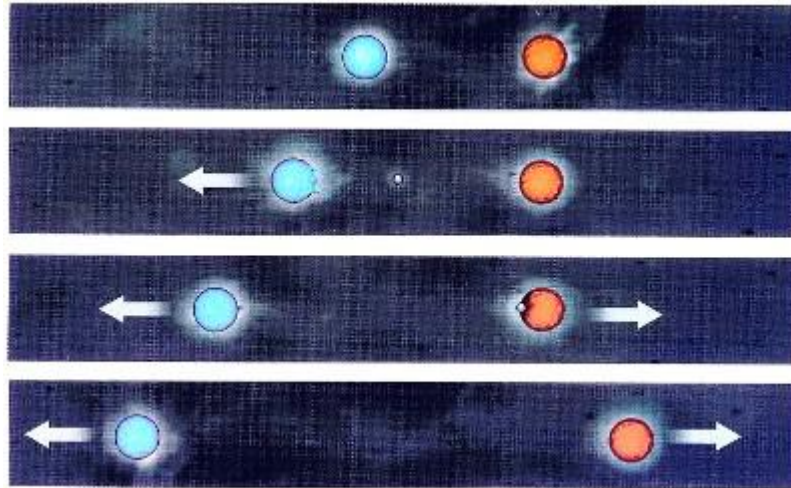
Bármelyik nézetet fogadjuk is el, figyelemre méltó körülmény, hogy úgy tűnik, ezeknek az állandóknak a számértékét nagyon finoman össze kell hangolni ahhoz, hogy lehetővé váljon az élet kifejlődése. Ha például az elektron töltése a ténylegestől csak hajszálnyival is eltérne, akkor megbomlana a csillagok belsejében az elektromágneses és a gravitációs erő közötti egyensúly. Ennek következményeként a csillagok vagy nem lennének képesek a hidrogént és a héliumot nehezebb elemekké alakítva energiát termelni, vagy nem következhetnének be szupernóvarobbanások. Az élet egyik esetben sem létezhetne. Végső soron abban reménykedhetünk, hogy megtaláljuk azt a teljes, mindenre kiterjedő, ellentmondásoktól mentes (konzisztens), egyesített elméletet, amelyik speciális közelítéseként az összes meglévő részelméletet magába foglalja. Ebben az esetben nem lenne szükség az elméletet önkényes számértékek (például az elektron töltésének nagysága) beillesztésével hozzáigazítani a valósághoz.

Ezen elmélet keresését a fizika egyesítésének nevezzük. Einstein élete második felében legnagyobb mértékben az egyesített elmélet keresésével foglalkozott, ám sikertelenül: akkoriban még nem érkezett el az ideje egy ilyen elmélet megalkotásának, hiszen bár rendelkezésre álltak a gravitációt és az elektromágneses kölcsönhatást leíró részelméletek, a magerőkről még nagyon keveset tudtak. Sőt mi több, amint a 9. fejezetben említettük, Einstein személy szerint nem hitt a kvantummechanika valóságosságában. Mindamellett ma már úgy tűnik, hogy a határozatlansági elv Világegyetemünk alapvető sajátossága. Egy sikeres egyesített elméletnek tehát mindenképpen tartalmaznia kell!

ezt az elvet.

Ma már sokkal kedvezőbbek a körülmények egy ilyen egyesített elmélet megalkotásához, hiszen sokkal többet tudunk a Világegyetemről. Azonban óvakodnunk kell a túlzott elbizakodottságtól – korábban már sokszor vezettek zsákutcába a csalóka sejtések. A XX. század elején például sokan úgy gondolták, hogy a rugalmassághoz vagy a hővezetéshez hasonlóan minden fizikai jelenség megmagyarázható az anyag folytonosságának feltevéséből kiindulva. Az anyag atomos szerkezetének felfedezése valamint a határozatlansági elv felismerése félreérthetetlenül pontot tett ezeknek a próbálkozásoknak a végére. Említhetnénk azt a példát is, amikor Max Born, Nobel-díjas fizikus 1928-ban a Göttingeni Egyetem látogatóinak egy csoportja előtt kijelentette: „A mai tudásunk szerinti fizika korszaka fél éven belül lezárul.” Elbizakodottságát Dirac nem sokkal korábban tett felfedezésére alapozta, akinek sikerült felállítania az elektron viselkedését leíró egyenletet. Úgy gondolták, hogy hamarosan fel tudják írni a proton viselkedésére vonatkozó, hasonló egyenletet – márpedig az elektronon és a protonon kívül abban az időben más elemi részecskét még nem ismertek –, és ezzel valóban lezárul az elméleti fizika. A neutron és a magerők felfedezése azonban megghiúsította ezeket a reményeket. Mindezek után a legóvatosabb optimizmusra sincs okunk arra vonatkozóan, hogy esetleg már a cél közelében járnánk a természet végső törvényeinek keresése útján.

A kvantummechanikában feltételezésünk szerint az anyag részecskéi közötti erőket vagy kölcsönhatásokat elemi részecskék hordozzák. Az anyagi részecske, például az elektron vagy a kvark kibocsát egy kölcsönhatást közvetítő részecskét, egy úgynevezett közvetítőrészecskét. A kibocsátás során bekövetkező visszalökődés megváltoztatja az anyagi részek sebességét, pontosan azért, amiért az ágyúgolyó kilövésének pillanatában az ágyú is hátralökődik. Ezután a közvetítőrészecske nekiütközik egy másik anyagi részecskének, amelyikben elnyelődik, megváltoztatva ezzel a befogadó részecske mozgását. Az emisszió és az abszorpció együttes eredménye ugyanaz, mintha valamilyen erő hatna a két anyagi részecske között.



Részecskék kicserélődése.

A kvantumelmélet szerint az erők a kölcsönhatást közvetítő részecskék kicserélődésekor lépnek fel.

Minden egyes kölcsönhatást a neki megfelelő, rá jellemző részecske közvetíti. Ha a közvetítőrészecskének nagy a tömege, akkor nehéz létrehozni, illetve nagy távolságra eljuttatni, ezért az általa közvetített kölcsönhatás hatótávolsága rövid lesz. Ha viszont a közvetítőrészecskének nincs nyugalmi tömege, akkor az erő hosszú hatótávolságú. Az anyagi részecskék között kicserélődő, kölcsönhatásokat közvetítő részecskéket virtuális részecskéknek nevezzük, mert a valóságos részecskékkel ellentétben ezek nem mutathatóak ki részecskedetektorok segítségével. Létezésükről azonban mégis tudunk, mert mérhető hatásuk van: előidézik az anyagi részecskék közötti erőhatásokat.

A kölcsönhatásokat hordozó részecskéket négy kategóriába soroljuk. Hangsúlyoznunk kell azonban, hogy ez az osztályozás teljesen önkényes, a fizikusok által megalkotott csoportosítás, amely a részecskeelméletek megalkotásakor kényelmes, azonban nem feltétlenül hordoz bármiféle mélyebb jelentést. Végző soron a legtöbb fizikus úgylis abban reménykedik, hogy sikerül megtalálni az egyesített elméletet, amely a négy kölcsönhatást egyetlen erő négy különböző megnyilvánulásaként fogja értelmezni. Tulajdonképpen nagyon sokan ezt tartják manapság a fizika legfontosabb célkitűzésének.

Az első csoportba a gravitációs erő tartozik. Ez az erő egyetemes, vagyis minden részecskére hat, nagysága a részecske tömegétől,

vagyis energiájától függ. A gravitációs erőt a gravitonoknak nevezett virtuális részecskék kicserélődésével szokták ábrázolni. A gravitáció az összes kölcsönhatás közül messze a leggyengébb, olyan gyenge, hogy kizárólag két különleges tulajdonságának köszönhetően vesszük egyáltalán észre. Egyrészt roppant nagy a hatótávolsága, másrészt mindig vonzó kölcsönhatás. Ennek köszönhetően két nagy testet, például a Napot és a Földet alkotó részecskék egyenként roppant gyenge gravitációs hatása összegeződik, és így számottevő nagyságú erőt hoz létre. A további három kölcsönhatás vagy rövid hatótávolságú, vagy hol vonzó, hol pedig taszító jellegű, – utóbbi miatt az összegződő járulékok sokszor kioltják egymást.

A következő csoportba az elektromágneses erőt soroljuk, amely az elektromosan töltött részecskék, például az elektronok vagy a kvarkok között hat, az elektromos töltés nélküli részecskék, például a neutrínók között viszont nem lép fel. Sokkal erősebb a gravitációnál: két elektron között például az elektromos és a gravitációs erők aránya egy a milliószor billiószor billióhoz (vagyis az 1-es után 42 darab nulla sorakozik). Az elektromágneses töltésnek azonban két fajtája van, a pozitív és a negatív. Két pozitív töltés között mindig elektromos taszítás lép fel, akárcsak két negatív töltés között. Egy pozitív és egy negatív töltés között ezzel szemben vonzóerő ébred.

Egy nagyméretű test, például a Föld vagy a Nap nagyjából azonos számú pozitív és negatív töltést tartalmaz. Ezért az egyes részecskék között fellépő vonzó- és taszítóerők csaknem teljesen kiegyenlítik egymást, emiatt az eredő elektromágneses erő nagyon kicsi. Az atomok és a molekulák szintjén azonban az elektromágneses erők válnak uralkodóvá. A negatív töltésű elektronok valamint az atommagban lévő, pozitív elektromos töltésű protonok közötti elektromágneses vonzás eredményeképpen keringhetnek az elektronok az atommag körül, hasonlóan ahhoz, ahogy a gravitációs vonzás Nap körüli pályáikon tartja a bolygókat. Az elektromágneses vonzást nagy számú, fotonnak nevezett virtuális részecske kicserélődéseként ábrázoljuk. A kicserélődő fotonok ebben az esetben is virtuális részecskék. Amikor azonban az atomon belül egy elektron az egyik pályáról átugrik egy, az atommaghoz közelebbi pályára, akkor ott egy valóságos foton

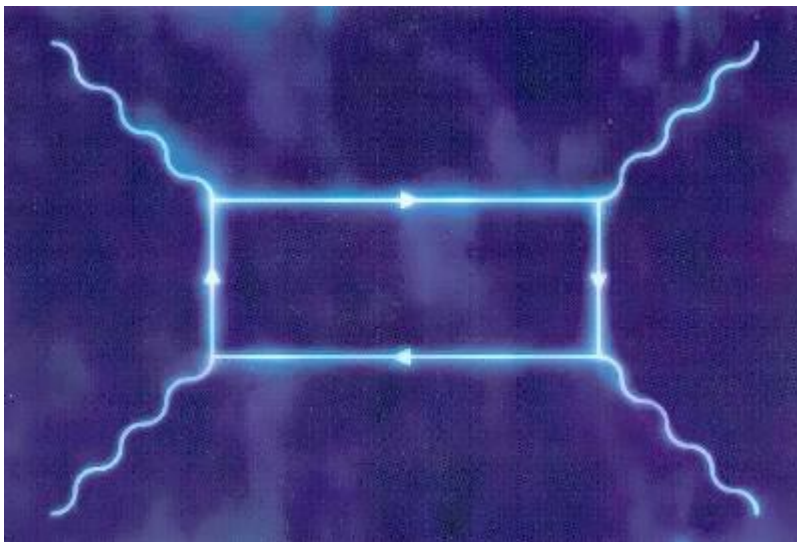
kisugárzása formájában energiakibocsátás történik. Ezt a valóságos fotont észlelni tudjuk, ha megfelelő a hullámhossza, akkor látható fény formájában, vagy valamilyen fotondetektorral, például fényképészeti filmen. Hasonlóképpen, amikor egy valóságos foton nekiütközik egy atomnak, akkor az atomban lévő valamelyik, az atommaghoz közeli pályán tartózkodó elektront arra kényszerítheti, hogy átugorjék egy távolabbi pályára. Ez a folyamat felhasználja a foton energiáját, így az elnyelődik.

A kölcsönhatások harmadik csoportja a gyenge kölcsönhatás^{*} (más néven gyenge magerő). A hétköznapi életünkben nem kerülünk kapcsolatba ezzel a kölcsönhatással. Ez a felelős ugyanakkor a radioaktivitásért^{*}, vagyis az atommagok elbomlásáért. A gyenge kölcsönhatás természetét egészen 1967-ig nem igazán sikerült megérteni, akkor azonban Abdus Salam, a londoni Imperial College munkatársa és Steven Weinberg a Harvard Egyetemen kidolgozott egy elméletet, amely egyesítette ezt a kölcsönhatást az elektromágnességgel, éppúgy, ahogyan mintegy száz évvel korábban Maxwell egyetlen elméletté egyesítette az elektromosságot és a mágnességet. Az elmélet előrejelzései olyan jól egyeztek a kísérletek eredményeivel, hogy Salam és Weinberg 1979-ben magkapta a fizikai Nobel-díjat. Abban az évben a harmadik kitüntetett az ugyancsak a Harvardon dolgozó Sheldon Glashow volt, aki szintén az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatást egyesítő elméletet dolgozott ki.

A negyedik kategóriába az erős kölcsönhatás (vagy erős magerő) tartozik. Ez a másik alapvető kölcsönhatás, amelyikkel a mindennapjaink során közvetlenül nem találkozunk. Mégis ez az a kölcsönhatás, amelyik a legtöbb bennünket körülvevő testet összetartja. Ez felelős a protonok és a neutronok belsejében a kvarkok egy-betartásáért, továbbá ezt tartja össze az atommagot alkotó protonokat és neutronokat. Az erős kölcsönhatás hiányában a pozitív töltésű protonok között fellépő elektromágneses taszítás az egyetlen protonból álló hidrogénatommag kivételével minden más atommagot részecskéire szakítana. Ezt a kölcsönhatást a gluonnak nevezett részecske közvetíti, amelyik csak önmagával és a kvarkokkal lép kölcsönhatásba.

Az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatás egyesítésének

sikere nyomán számos próbálkozás történt e két erőnek az erős kölcsönhatással történő egyesítésére, az úgynevezett nagy egyesített elmélet (GUT, Grand Unified Theory) formájában. Ez a megnevezés persze erős túlzás, hiszen az így kapott elmélet sem nem nagy, sem nem teljesen egyesített, a gravitációt ugyanis nem tartalmazza.



*Virtuális részecske-antirészecske pár Feynman-diagramja.
Az elektronra alkalmazott határozatlansági elv előírja, hogy még az
üres térben is virtuális részecske-antirészecske pároknak kell
keletkezniük, majd annihilálódnuk.*

Az elmélet valójában nem is teljes, mert számos olyan paramétert tartalmaz, amelyek számértéke nem vezethető le az elméletből, hanem úgy kell őket megválasztani, hogy egyezést kapjunk a kísérletek eredményeivel. Mindamellett ez is egy lépés lehet a teljes, valóban egyesített elmélet felé.

A legnagyobb akadály, ami a gravitációt a többi kölcsönhatással egyesítő elmélet útjában áll, az a körülmény, hogy a gravitáció elmélete – vagyis az általános relativitáselmélet – az egyetlen a kölcsönhatásokat leíró elméletek közül, amelyik nem kvantumelmélet: ugyanis nem veszi figyelembe a határozatlansági elvet. Minthogy azonban a többi kölcsönhatást leíró részelméletek alapvetően a kvantummechanikától függnek, a gravitációt csak akkor lehet egyesíteni a többi kölcsönhatással, ha megtaláljuk a módját, miként lehet beépíteni a határozatlansági elvet az általános relativitáselméletbe. Eddig azonban még senkinek sem sikerült

megalkotnia a gravitáció kvantumelméletét.

A gravitáció kvantumelmélete azért bizonyult ilyen kemény diónak, mert a határozatlansági elv értelmében még az „üres” tér is tele van virtuális részecske-antirészecske párokkal. Ha ez nem így lenne – vagyis ha az „üres” tér valóban teljesen üres lenne –, akkor minden mezőnek, mint például a gravitációs vagy az elektromágneses mezőnek pontosan nullának kellene lennie. A térerősség és annak változási sebessége azonban ugyanolyan párt alkot, mint a részecske helye és sebessége (helyének időegység alatti megváltozása): a határozatlansági elvből következően minél pontosabban akarjuk megismerni az egyiket, annál pontatlanabban ismerhetjük csak a másikat. Márpedig ha a mező értéke az üres térben rögzítetten nulla lenne, akkor ez azt jelentené, hogy nem csak a mező erősségét ismerjük pontosan (nulla), hanem annak változási sebességét is (ugyancsak nulla), ami megsértené a határozatlansági elvet. Ezért tehát a térerősségben szükségszerűen jelen van valamilyen minimális bizonytalanság, vagy más néven kvantumfluktuáció.

Ezeket a fluktuációkat olyan részecskepárokként képzelhetjük el, amelyek egy pillanatban egyszerre felbukkannak, eltávolodnak egymástól, majd ismét összetalálkoznak és annihilálódnak. Ezek virtuális részecskék, akárcsak a kölcsönhatásokat közvetítő részecskék, vagyis a valóságos részecskékkel ellentétben nem figyelhetők meg közvetlenül a részecske-detektorokkal. Közvetett hatásaik azonban mérhetőek, ilyen például az elektronpályák energiaszintjének nagyon csekély megváltozása. E mérések eredménye figyelemre méltóan egyezik az elméleti számításokból kapott adatokkal. Az elektromágneses tér fluktuációi esetében ezek a részecskék virtuális fotonok, a gravitációs mező fluktuációi esetében pedig virtuális gravitonok. Ezzel szemben a gyenge és az erős kölcsönhatás fluktuációi esetében a virtuális párok anyagi részecskék párpai, például elektronok vagy kvarkok, és a nekik megfelelő antirészecskék.

A problémát az jelenti, hogy a virtuális részecskéknek energiájuk van. Ráadásul mivel végtelen számú virtuális pár keletkezik, ezeknek végtelenül sok energiája lenne, ami Einstein $E=mc^2$ formulája (lásd az 5. fejezetben) értelmében végtelenül nagy

tömegnek felelne meg. Az általános relativitáselmélet értelmében ez azt jelentené, hogy gravitációs hatásuk végtelenül kicsiny méretűre görbítené össze a Világegyetemet. Ez nyilvánvalóan nem történik meg! Hasonló módon, látszólag képtelen végtelenek bukkannak fel más részelméletekben is, így az erős, a gyenge és az elektromágneses kölcsönhatásokat leíró elméletekben. Ám mindezen esetekben a renormálásnak nevezett eljárás segít kiiktatni ezeket a végtelen mennyiségeket, ezért lehetett egyáltalán megalkotni ezeknek a kölcsönhatásoknak a kvantumelméletét.

A renormálás során új végteleneket vezetünk be, amelyek hatására kiesnek az elméletből az ott megjelent végtelen mennyiségek. A végteleneknek azonban nem szükséges pontosan kiegyenlíteniük egymást. Az új végteleneket úgy is megválaszthatjuk, hogy kis maradékok jöjjenek létre. Ezeket a kis maradékokat nevezzük az elméletben renormált mennyiségeknek.

Bár a gyakorlatban ez a módszer matematikailag megkérdőjelezhető, mégis úgy tűnik, működik. Az erős, a gyenge és az elektromágneses kölcsönhatás elméletében alkalmazva a megfigyelésekkel rendkívül pontosan egyező eredményeket kaptak. A teljes, mindent leíró elmélet keresése szempontjából azonban van a renormálásnak egy nagy hátulütője. A módszer alkalmazása ugyanis azt jelenti, hogy a tömegek és az erők nagyságának tényleges értékei nem származtathatóak az elméletből, hanem egyszerűen csak úgy kell megválasztani őket, hogy a megfigyelésekkel egyező eredményeket kapjunk. Sajnos, amikor megpróbáljuk a renormálás segítségével eltüntetni a kvantummechanikai végteleneket az általános relativitáselméletből, akkor csak két olyan mennyiség van, amelyikkel az illesztést elvégezhetjük: a gravitáció erőssége, illetve a kozmológiai állandó. Az utóbbi fogalmat (amint azt a 7. fejezetben láttuk) Einstein vezette be az egyenleteibe, mert úgy gondolta, hogy a Világegyetem nem tágul. Mint kiderül, e két mennyiség illesztése nem elegendő az összes végtelen eltüntetéséhez. Ezért aztán a gravitáció kvantumelméletére olyan elméletet kapunk, amelyből az olvasható ki, hogy bizonyos mennyiségek, például a téridő görbülete valóban végtelenek. Márpedig megfigyeléseink és méréseink tanúsága szerint ezek a mennyiségek határozottan végesek!

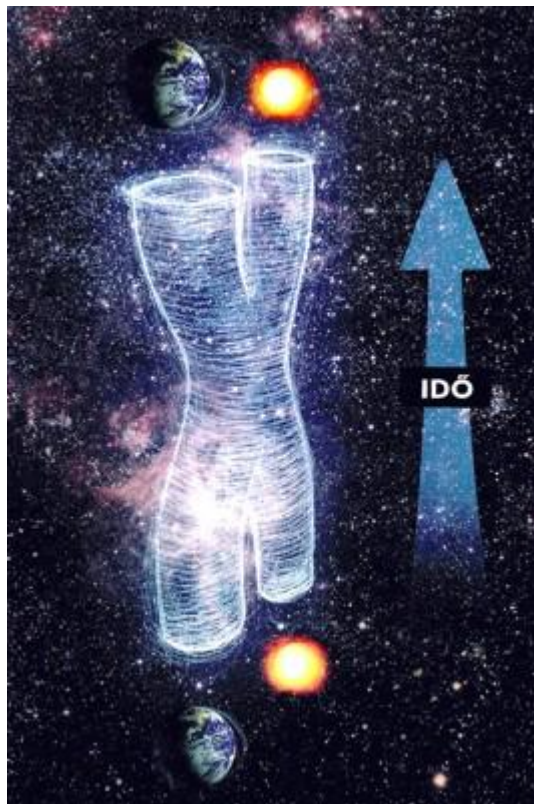
A fizikusok már régóta sejtették, hogy kikerülhetetlen problémát fog jelenteni, amikor az általános relativitáselméletbe be akarják építeni a határozatlansági elvet, azonban ezt csak 1972-ben sikerült részletes számításokkal alátámasztani. Négy évvel később egy lehetséges megoldásként felvetették a szupergravitáció gondolatát. El kell döntenünk tehát, hogy a szupergravitációban is maradnak-e olyan végtelenek, amelyeket nem sikerül eltüntetni. Sajnos az ehhez szükséges számítások olyan hosszadalmasak és bonyolultak, hogy senki sem vállalkozott az elvégzésükre. A felsorolt problémákat az is tetézte, hogy úgy tűnt, a szupergravitáció elméletében előforduló részecskék nem feleltethetők meg a megfigyeltnek. Mégis a legtöbb kutató ekkor úgy vélte, hogy az elmélet némileg módosítva megadhatná a helyes választ a gravitáció és a többi erő egyesítésének a problémájára. Azonban 1984-ben gyökeres fordulat következett be, amikor egy csapásra az úgynevezett húrelmélet került az érdeklődés homlokterébe.

A húrelmélet bevezetése előtt úgy gondolták, hogy minden elemi részecske a tér egyetlen pontját foglalja el. A húrelméletben ezzel szemben az alapvető objektumok nem pontszerű részecskék, hanem olyasvalamik, amiknek hosszuk van, más dimenziójuk azonban nincs, mint egy végtelenül vékony húrnak. Ezeknek a hűroknak lehetnek végeik (ezek az úgynevezett nyitott hűrok), vagy önmagukkal összekapcsolva zárt hurkokat alkothatnak (zárt hűrok). Egy elemi részecske minden pillanatban a tér egy bizonyos pontjában tartózkodik. A hűr viszont minden pillanatban egy vonalat foglal el a térben. Két hűr többféleképpen is egyesülhet. Nyitott hűrok egyetlen hűrrá kapcsolódhatnak össze, ilyenkor a nyitott hűrok egyszerűen végeikkel egymáshoz kapcsolódnak. Zárt hűrok esetében az összekapcsolódás után a nadrág két szárára emlékeztető alakzat jön létre. Hasonlóképpen egyetlen hűr két önálló hűrra szakadhat.

Ha a Világegyetem alapvető objektumai a hűrok, akkor mit mondhatunk a kísérleteinkben megfigyelt elemi részecskékről? A húrelmélet a korábban különböző, pontszerű elemi részecskéknek gondolt objektumokat a hűr különböző rezgéseinek tekinti, hasonlóaknak a papírsárkány tartókötelén kialakuló rezgésekhez. Ám a hűrok és a rajtuk kialakuló rezgések olyan parányiak, hogy

még a legkorszerűbb eljárásokkal sem lehet felbontani az alakjukat, ezért minden kísérletünkben kicsiny, szerkezet nélküli pontokként viselkednek. Képzeljük el, hogy egy nagyítólencsével egyre közelebbről vizsgálunk egy porszemet, mígnem azt vesszük észre, hogy szabálytalan vagy esetleg éppen húrra emlékeztet az alakja, holott messziről szerkezet nélküli pontnak tűnt.

A húrelméletben egy részecske másik részecske általi kibocsátása vagy elnyelése a nekik megfelelő hurok osztódásának, illetve egyesülésének felel meg. A részecskékkel dolgozó elméletben például a Nap Földre gyakorolt gravitációs hatását a gravitációs kölcsönhatást közvetítő részecskék, a gravitonok kibocsátása okozza, – ezeket a Nap anyagát alkotó anyagi részecskék bocsátják ki, és a Földet felépítő anyagi részecskék nyelik el. A húrelméletben ugyanez a folyamat egy H alakú csővezetéknek felel meg (a húrelmélet fogalmai bizonyos értelemben a vízvezeték-szereléshez állnak legközelebb). A H két függőleges szára felel meg a Napban, illetve a Földön található két részecskének, míg a vízszintes összeköttetés jelöli a két részecske között közvetítő gravitont.



Feynman-diagramok a húrelméletben.

A húrelméletben a hosszú hatótávolságú erőket úgy tekintjük mint

amelyeket egymással érintkező csövek hoznak létre, nem pedig a közvetítőrészekké kölcsönhatásai.

A húrelméletnek különös története van. Eredetileg az 1960-as évek végén találták ki, amikor megpróbálták felállítani az erős kölcsönhatást leíró elméletet. Az volt az elképzelés, hogy a részecskéket, például a protont és a neutront húron kialakuló rezgéseként lehet felfogni. A részecskék közötti erős kölcsönhatás a részecskéket jelentő hurok közötti összekötő huroknak tekinthetők, pókhálószerű szerkezetet alkotva. Ez az elmélet azonban csak akkor vezetett a részecskék között ténylegesen megfigyelt nagyságú kölcsönhatásra, ha a hurokat tíz tonna húzóerejű gumiszalagoknak tekintették.

1974-ben Joel Scherk (École Normale Supérieure, Párizs) és John Schwarz (Kaliforniai Műszaki Egyetem) megjelentetett egy cikket, amelyben kimutatták, hogy a húrelmélet képes a gravitációs erő természetét is leírni, de csak akkor, ha a hurokban ébredő feszültséget ezerbilliószor billiószor billió (az 1-es után 39 nulla áll) tonna erejűnek képzeljük el. Közönséges távolságokon a húrelmélet előrejelzései pontosan megegyeztek az általános relativitáselméletből kapott értékekkel, azonban nagyon kis távolságok esetében (itt a centiméter milliárdod billiomod billiomod részéről van szó, vagyis egy centiméter osztva egy 1-es után 33 nullából álló számmal) némi eltérés mutatkozott. Munkájuk azonban nem keltett különösebb érdeklődést, mert éppen abban az időben a legtöbben elvetették az eredeti, az erős kölcsönhatás leírására kitalált húrelméletet. Úgy tűnt ugyanis, hogy az erős kölcsönhatás kvarkokkal és gluonokkal operáló elmélete jobban illeszkedik a megfigyelési eredményekhez. Scherk időközben tragikus körülmények között elhunyt (cukorbeteg volt, kómába esett, de senki sem volt a környezetében, aki észrevette volna, és a segítségére siethetett volna), így Schwarz magára maradt mint a húrelmélet szinte egyetlen támogatója, de immár a hurok eredetileg feltételezettnél sokszorosan nagyobb feszültségével.

1984-ben azonban hirtelen megélénkült az érdeklődés a húrelmélet iránt, aminek két oka volt. Egyrészt a fizikusoknak nem sikerült érdemi előrehaladást elérni a szupergravitáció kutatásában, nem sikerült kimutatni sem véges voltát, sem pedig azt, hogy

magyarázatot tudna adni a megfigyelt részecskékre. A másik ok John Schwarz ekkor publikált újabb cikke volt, amelyben társszerzőjével kimutatta, hogy a húrelmélet képes lehet magyarázatot szolgáltatni az eredendően balkezes részecskék létezésére. (A legtöbb részecske ugyanúgy viselkedik akkor is, ha a kísérleti elrendezést a tükörképével helyettesítjük, ám egyes részecskék ilyenkor másképp viselkednek. Olyan, mintha vagy jobb- vagy balkezesek lennének, szemben a kétkezes többséggel.) Bármilyen volt is az oka, tény, hogy hamarosan sokan kezdtek a húrelméleten dolgozni. Hamarosan kifejlesztették egy újabb változatát, amelyik, úgy tűnt, képes lehet magyarázatot adni a megfigyelt részecskék típusaira.

A húrelméletben is felbukkannak a nemkívánatos végtelenek, azonban a fizikusok úgy vélik, hogy az elmélet végső változatában ezek kiejtik egymást (bár ebben még ők sem teljesen biztosak). A húrelméletnek azonban van egy ennél sokkal nagyobb problémája is: úgy tűnik, csak akkor konzisztens, ha a téridő vagy tíz, vagy pedig huszonhat dimenziós, nem pedig négy, ahogyan azt megszoktuk! Természetesen az extra téridőbeli dimenziók kiváló terepet nyújtanak a sci-fi írók számára. Valójában ideális eszközt kínálnak a relativitáselmélet által felállított korlát megkerülésére, mely szerint nem lehet sem fénynél gyorsabban sem az időben visszafelé utazni (lásd a 10. fejezetben). Az elképzelések szerint az extra dimenziókon keresztül rövid, átvezető utakat lehetne találni. Erről a következőképpen alkothatunk képet. Képzeljük el, hogy a tér, amelyikben élünk, csak kétdimenziós, és körgyűrű vagy fánk alakúra van összegömbülve. Ha a gyűrű belső felületén tartózkodunk, és el akarunk jutni a gyűrű áttellenes pontjába, akkor csak a gyűrű belső peremét alkotó körív mentén egy félkört megtéve érhetjük el a kívánt pontot. Ha viszont képesek vagyunk kilépni a harmadik dimenzióba, akkor elszakadhatunk a gyűrű felszínétől, és egyszerűen a belső átmérője mentén elérjük célunkat.

Miért nem vesszük észre az extra dimenziókat, ha azok valóban léteznek? Miért csak három térbeli és egy időbeli dimenziót látunk? Egyes elképzelések szerint a többi dimenzió nem olyan, mint az ismert négy, hanem össze vannak gömbülve egy roppant kicsiny méretű, a centiméter milliomod billiomod billiomod részét kitevő

térrészbe. Ez olyan kicsi, hogy egyszerűen észre sem vesszük: emiatt csak egy időbeli és három térbeli dimenziót érzékelünk, amelyekben a téridő meglehetősen sík. Ennek szemléltetése érdekében tekintsünk például egy szalmaszálat. Közelről nézve a felülete kétdimenziós. A felületén lévő pont helyét tehát két számmal adhatjuk meg, a szalmaszál mentén, illetve egy, a henger felületén mért körkörös távolsággal. Ez a körkörös dimenzió azonban sokkal kisebb, mint a szál hossza. Ezért ha a szalmaszálat elég messziről nézzük, akkor ezt a második dimenziót, a vastagságot nem érzékeljük, és a szálat egydimenziósnek vélhetjük. A húrelmélet hívei szerint ugyanez a helyzet a téridővel is: a nagyon kis méretek világában tízdimenziós és erősen görbült, nagyobb léptékeknél azonban nem vesszük észre az erős görbületet és az extra dimenziókat.

Ha ez a kép helyes, akkor ez nagyon rossz hír a leendő űrutazóknak: az extra dimenziók ugyanis túlságosan kicsik ahhoz, hogy űrhajóval közlekedni lehetne bennük. Ugyanakkor komoly fejtörést okoznak a tudósoknak is, meg kellene ugyanis magyarázni, miért vannak egyes dimenziók kicsiny gömbbé összezsugorodva, míg mások nem. Feltételezhetően az ősi Világegyetemben az összes dimenzió erőteljesen görbült volt. Akkor viszont miért csak egy időbeli és három térbeli dimenzió simult ki, miközben a többi összetekeredve maradt?

A kérdésre az egyik lehetséges választ az úgynevezett antropikus elv^{*} adja, ami tömören így foglalható össze: „Azért látjuk éppen ilyennek a Világegyetemet, mert mi magunk itt vagyunk benne.” Az antropikus elv két változata létezik, a gyenge és az erős. A gyenge antropikus elv azt állítja, hogy a térben és/vagy időben nagy vagy végtelen világegyetemben az értelmes élet kifejlődéséhez szükséges feltételek csak térben és időben korlátozott tartományokon belül teljesülnek. Ezért az ezen tartományokon belül élő intelligens lények nem lennének meglepve, ha a környezetükben azt tapasztalnák, hogy a világegyetem tulajdonságai kielégítik a saját létezésükhöz szükséges feltételeket.

Egyesek azonban még tovább mennek, és az antropikus elv úgynevezett erős változata mellett foglalnak állást. E szerint vagy nagyon sok különböző világegyetem létezik, vagy az egyetlen

Világegyetemnek sok különböző tartománya, amelyek mindegyikében rá jellemző kezdeti feltételek uralkodtak, és talán még a tudomány törvényei is különbözőek. A legtöbb világegyetemben a körülmények nem alkalmasak a bonyolult szervezetek létrejöttéhez: csak a miénkhez hasonlóakban fejlődhetnek ki értelmes lények, és tehetik fel a kérdést: miért olyan a Világegyetem, amilyennek látjuk? Ezek után egyszerű a válasz: ha nem ilyen lenne, akkor nem lennénk itt!

Kevesen vitatják csak a gyenge antropikus elv érvényességét vagy hasznosságát, ha azonban a Világegyetem megfigyelt állapotát az erős antropikus elvvel szeretnénk magyarázni, akkor számos ellenvetés merül fel. Például milyen értelemben tekinthetjük létezőeknek mindezen világegyetemeket? Ha valóban függetlenek egymástól, akkor ami az egyik világegyetemben történik, annak nincs megfigyelhető következménye a másik világegyetemre nézve. Ezért a gazdaságosság elvét (Occam borotváját) alkalmazva kidobhatjuk az elméletből. Ha ezzel szemben ezek csak ugyanannak a világegyetemnek a különböző tartományai lennének, akkor a tudomány törvényeinek minden egyes tartományban ugyanolyanoknak kellene lenniük, mert különben nem tudnánk folytonosan (matematikai értelemben, azaz szingularitás nélkül) átjutni az egyik tartományból a másikba. Ebben az esetben a tartományok között csak a kezdeti állapotuk lenne az egyetlen különbség, aminek következtében az erős antropikus elv a gyengére redukálna.

Az antropikus elv kínál egy lehetséges választ arra a kérdésre is, hogy miért vannak a húrelmélet extra dimenziói felcsavarodva. Két térbeli dimenzió nem látszik elegendőnek a hozzánk hasonló bonyolultságú lények kialakulásához. Ha például kétdimenziós lények élnének egy körön (a földfelszín kétdimenziós megfelelőjén), akkor csak úgy tudnának elmenni egymás mellett, hogy átmásznak egymáson. Ha pedig egy kétdimenziós lény megeszik valamit, amit nem tud maradéktalanul megemészteni, akkor a maradéknak ugyanazon az útvonalon kellene távoznia, ahol a táplálékot elfogyasztotta. Ellenkező esetben ugyanis, vagyis ha testén keresztül két testnyílást összekötő járat lenne, akkor ez két egymástól független részre osztaná a testet, vagyis a kétdimenziós

lény két darabra szakadna. Hasonlóképpen az sem magától értetődő, milyen módon lehetne fenntartani a vérkeringést egy kétdimenziós teremtményben.

A háromnál több térbeli dimenzió létezése ugyancsak problémákat vetne fel. A két test között ható gravitációs erő ebben az esetben a távolság növekedésével gyorsabban csökkenne, mint a háromdimenziós világunkban. (Három dimenzióban a gravitációs erő a negyedére csökken, ha a testek távolságát a kétszeresére növeljük. Négy dimenzióban a kétszeres távolsághoz nyolcszor, öt dimenzióban pedig tizenhatszor kisebb gravitációs erő tartozna és így tovább). Ez azért fontos különbség, mert ily módon a bolygók, köztük a Föld, Nap körüli pályája instabillá válna, a körpályától való legcsekélyebb eltérés esetén (amit a szomszédos bolygók gravitációs hatása könnyűszerrel előidézhetne) a Föld spirális pályán örökre eltávolodna a Naptól, vagy belezuhanna abba. Vagy megfagynánk, vagy pedig elégnénk. Valójában a gravitáció ilyen távolságfüggése a Nap stabil csillagként létezését is lehetetlenné tenné, a nyomás nem lenne képes egyensúlyt tartani a gravitációval. A Nap szétesne, vagy fekete lyukká omlana össze. Bármelyik eset következne is be, a földi élet nem sok hasznát venné fény- és hőforrásként. Kisebb léptékben az atomokban az elektronokat az atommag körül tartó elektromos erők is a gravitációs erőhöz hasonlóan viselkednének. Ennek megfelelően az elektron is vagy megszökne az atomból, vagy spirális pályán bezuhanna az atommagba. Akárhogy is, nem létezhetnének az általunk ismert szerkezetű atomok.

Nyilvánvalónak látszik tehát, hogy az élet, legalábbis az általunk ismert formájában csak a téridő olyan tartományaiban létezhet, ahol egy időbeli és három térbeli dimenzió nincs nagyon kicsire összezsavarodva. Eszerint elfogadhatnánk a gyenge antropikus elvet, amennyiben be tudnánk bizonyítani, hogy a húrelmélet legalábbis megengedi ilyen tartományok létezését a Világegyetemben – márpedig úgy tűnik, hogy a húrelmélet ezt valóban megengedi. Létezhetnek a Világegyetemben további tartományok is, sőt, akár további világegyetemek is (bármit jelentsen is ez), amelyekben minden dimenzió kicsire össze van csavarodva, vagy amelyekben négynél több közel sík szerkezetű dimenzió

található, azonban ezekben a tartományokban nem létezhetnek intelligens lények, akik meg tudnák figyelni a különböző számú tényleges dimenziót.



A háromdimenziósság jelentősége.

Háromnál több térbeli dimenzió esetén a bolygópályák instabilak lennének, és a bolygók vagy belezuhanának a Napba, vagy végleg kiszabadulnának a vonzásából.

A dimenziók kérdésén kívül a húrelmélet további problémája, hogy legalább öt különféle elmélet létezik (két nyitott és három különféle zárt húrokkal dolgozó elmélet), továbbá a húrelmélet által jelzett extra dimenziók számtalan különböző módon csavarodhatnak fel. Miért kellene ezen számtalan lehetőség közül éppen egy adott húrelméletet és egyetlen felcsavarodási módot kiválasztanunk? Egy ideig nem látszott körvonalazódni a válasz, a kutatás megfeneklett. Azután körülbelül 1994-től kezdve a kutatók kezdték felismerni a dualitásnak nevezett jelenséget: a különböző húrelméletek és a különböző felcsavarodási módok négy dimenzióban ugyanarra az eredményre vezethetnek. Sőt, a tér egyetlen pontját elfoglaló részecskék és a vonalszerű húrok mellett további alakzatokat is találtak, amelyek két vagy több dimenziós térfogatokat foglalnak el a

térben. Ezeket p -bránoknak nevezték el. (A részecskét tehát 0-bránnak lehet tekinteni, a húrt 1-bránnak, de találtak p -bránokat $p=2$ és $p=9$ között minden lehetséges értékre. A 2-bránt valamilyen kétdimenziós membránhoz hasonlóan képzelhetjük el. Az ennél több dimenziós bránokat nehezebb szemléltetni.) Úgy tűnik, mindez azt jelzi, hogy valamiféle demokrácia van jelen (olyan értelemben, hogy mindenki egyformán szóhoz jut) a szupergravitáció, a húrelmélet és a p -brán-elmélet között: az elméletek illeszkednek egymáshoz, de egyik sem tekinthető alapvetőbbnek a másik kettőnél. Sokkal inkább úgy tűnik, mintha ugyanannak a mélyebb tartalmú elméletnek a különböző közelítései lennének, ahol mindegyik más helyzetben érvényes.

A kutatók régóta keresik ezt a mélyebb tartalmú elméletet, ám mindeddig sikertelenül. Lehetséges, hogy az alapvető elmélet nem csak egyféleképpen fogalmazható meg, hasonlóan ahhoz, hogy az aritmetika sem egyféle módon építhető fel az axiómák megadott csoportjára, amint arra Gödel rámutatott. Talán olyan a helyzet, mint a térképek esetében – nem használhatunk egyetlen, sík térképet a gömb alakú Föld vagy egy gyűrű alakú test felszínének ábrázolására: a Föld esetében legalább két, a gyűrűnél pedig négy térképre van szükség, ha minden pontot ábrázolni akarunk. Minden egyes térkép csak egy korlátozott tartományban érvényes, de a különböző térképek egyes tartományokban átfedik egymást. A térképek együttesen viszont az egész felület teljes ábrázolását adják. Hasonlóképpen a fizikában is előfordulhat, hogy a különböző helyzetek leírására eltérő formalizmust kell használnunk, azonban adódhatnak olyan helyzetek is, amelyekben e formalizmusok közül több is használható, és azok egyazon eredményre vezetnek.

Ha fenti okoskodásunk helyes, akkor a különböző formalizmusok együttese a teljes egyesített elméletnek tekinthető, jöllehet ez olyan elmélet lenne, amelyik nem fejezhető ki posztulátumok egyetlen csoportjával. De talán még ez is több annál, mint amit a természet megenged. Lehetséges, hogy nem is létezik egyesített elmélet? Talán délibábot kergetünk? Három lehetőséget vehetünk számításba:

1. Valóban létezik a teljes egyesített elmélet (esetleg egymást átfedő formalizmusok alakjában), és ha elég okosak vagyunk, akkor egy szép napon erre rá is találunk.

2. Nem létezik a Világegyetem végső elmélete, csak olyan elméletek végtelen sorozata, amelyek egyre pontosabban, de soha sem tökéletesen pontosan írják le a Világegyetemet.

3. Nem létezik a Világegyetem egészét leíró elmélet, az események egy adott határon túl nem jósolhatók meg, hanem véletlenszerű és önkényes módon következnek be.

Egyesek nyilván a harmadik lehetőség mellett szállnának síkra, abból a megfontolásból, hogy ha létezne a törvények teljes rendszere, akkor az korlátozná Isten abbéli szabadságát, hogy megváltoztassa eddigi álláspontját és mégiscsak beleavatkozzék a világ menetébe. Igen ám, de mivel Isten mindenható, vajon nem korlátozhatja-e ő maga saját szabadságát, ha kívánja? Kicsit olyan ez az okoskodás, mint az ősi paradoxon: képes-e Isten olyan nehéz követ teremteni, amelyet ő maga sem tud felemelni? Amint arra már Szent Ágoston is rámutatott, azon elképzelés, miszerint Isten esetleg meg akarja változtatni korábbi szándékát, nem egyéb, mint annak a téveszmének a megnyilvánulása, hogy Isten az időben létezik. Ám az idő valójában csak annak a Világegyetemenek az egyik tulajdonsága, amelyet Isten megteremtett. Feltételezhetően Isten pontosan tudta, mik a szándékai, amikor megteremtette a világot!

A kvantummechanika segítségével arra a felismerésre jutottunk, hogy az események nem jelezhetők előre teljes pontossággal: mindig jelen van valamekkora bizonytalanság. Ha úgy tetszik, ezt a véletlenszerűséget Isten közbeavatkozásának tulajdoníthatjuk. Ám ez meglehetősen különös fajta közbeavatkozás lenne, hiszen így semmi jele sem lenne annak, hogy az bármely cél elérése érdekében történne. Valójában ha bármiféle célja volna, akkor a definíció szerint már nem lenne véletlenszerű. Napjainkban a fenti harmadik lehetőséget meglehetősen nagy bizonyossággal kizártuk, amikor újradefiniáltuk a természettudomány célját: törvények olyan csoportjának a megfogalmazására törekszünk, amelyek csak a határozatlansági elv által felállított korlátokon belül teszik lehetővé az események előrejelzését.

A második lehetőség, amely szerint egyre pontosabb elméletek végtelen sorozata létezik, összhangban van eddigi tapasztalatainkkal. Számos alkalommal sikerült megnövelni méréseink érzékenységét, vagy új típusú megfigyelések elvégzésére nyílt lehetőségünk – és új, az addigi elméleteink által előre nem jelzett jelenségeket fedeztünk fel, majd ezek magyarázatára egy jobb elméletet dolgoztunk ki.

Az egyre nagyobb energiákon kölcsönható részecskék vizsgálata révén joggal remélhetjük, hogy felfedezzük a szerkezetek egy új rétegét, amely alapvetőbb, mint a ma „elemi” részecskéknek tartott kvarkok és az elektronok szintje.

A gravitáció azonban határt szabhat ezeknek az „egymásba skatulyázott dobozoknak”. Ha egy, az úgynevezett Planck-energiánál nagyobb energiájú részecskét tekintünk, akkor annak tömege oly mértékben koncentrálódna, hogy az különválna a Világegyetem többi részétől, és kicsiny fekete lyukat alkotna. Úgy tűnik tehát, hogy az egyre nagyobb energiák felé haladva az egyre bonyolultabb elméleteknek valamiféle határához érünk, vagyis léteznie kell a Világegyetem végső elméletének. Mindamellett a Planck-energia még rettenetesen távol van azoktól az energiáktól, amelyeket jelenleg laboratóriumainkban elő tudunk állítani. A belátható jövőben ezt a szakadékot nem fogjuk tudni részecskegyorsítóinkkal áthidalni. A Világegyetem nagyon korai időszaka azonban pontosan az a színpad, ahol az ekkora energiáknak fel kellett lépniük. Jó esélyünk van arra, hogy a Világegyetem ősi állapotának tanulmányozása a matematikai ellentmondás-mentesség követelményével együtt elvezet bennünket a teljes egyesített elméletig. Ezt még akár közülünk is megérheti valaki, feltéve, hogy nem pusztítjuk el addig egész civilizációnkat!

Newton korában egy iskolázott ember legalább nagy vonalakban át tudta látni az emberiség egész tudáskincsét. Azóta azonban a természettudomány fejlődésének üteme ezt lehetetlenné tette. Mivel az elméleteket folyamatosan tovább kell fejleszteni, ha azt akarjuk, hogy az újabb mérési eredményekről is számot tudjanak adni, ezért az egyre újabb változatokat soha nem lehet kellően megemésztetni vagy leegyszerűsíteni, hogy azok a laikusok számára is érthetőek legyenek. Szakembernek kell lenni, és még akkor is csak abban

reménykedhetünk, hogy a tudományos elméletek egy töredékét képesek leszünk felfogni. Ráadásul a rohamtempójú fejlődés következtében mindaz, amit az iskolában vagy az egyetemen megtanultunk, hamarosan kissé túlhaladottá válik. Másrészt viszont, ha Eddingtonnak hinni lehet, hetven évvel ezelőtt csak két ember értette az általános relativitáselméletet. Ma ez az egyetemről kikerülő szakemberek tízezreinek megadatik, miközben rajtuk kívül emberek milliói alkothatnak maguknak legalább valamilyen halvány képet az elmélet lényegéről. Ha sikerülne felfedezni a teljes egyesített elméletet, akkor csak idő kérdése lenne, mikorra sikerülne az elméletet annyira megemészteni és leegyszerűsíteni, hogy legalább főbb vonalakban az iskolákban is tanítani lehessen. Akkor valamilyen szintig mindannyian meg fogjuk érteni a Világegyetemet irányító, és a létezésünket eredményező törvényeket.

Még ha sikerülne is felfedezni az egyesített elméletet, ez két okból sem jelentené azt, hogy teljes általánosságban képesek lennénk a Világegyetem minden történésének előrejelzésére. Az egyik ok a kvantummechanikai határozatlansági elv által állított korlát, amely elvi akadályt jelent előrejelzéseink pontosságának fokozásában. Ez a korlát semmiféleképpen sem kerülhető meg. A gyakorlat szempontjából azonban ez az első akadály sokkal kevésbé zavaró, mint a második. Az utóbbi abból a körülményből következik, hogy várhatóan a nagyon egyszerű esetek kivételével nem fogjuk tudni megoldani egy ilyen elmélet egyenleteit. Amint korábban említettük, senki sem tudja egzakt módon megoldani a kvantummechanika egyenleteit, ha az atom az atommagon kívül egynél több elektront tartalmaz. Ugyancsak nem tudjuk így megoldani a Newton gravitációs törvényéből következő egyenleteket, ha három vagy annál több test mozog egymás gravitációs terében, sőt, a testek számának növekedésével az egyenletek rohamosan egyre bonyolultabbakká válnak. A különféle alkalmazások céljaira persze rendszerint megfelelőek a közelítő megoldások, ám ezek aligha felelnek meg a „mindenség egyesített elmélete” névvel szembeni, felfokozott várakozásoknak.

Ma már ismerjük az anyag viselkedését irányító törvényeket, ez alól csak a legszélsőségesebb körülmények képeznek kivételt. Nevezetesen, ismerjük mindazokat az alapvető törvényeket,

amelyek a kémia és a biológia jelenségeinek irányításáért felelősek. Mégsem mondhatjuk azt, hogy e tudományágak működését már megismertük, hiszen mind a mai napig meglehetősen kevés sikert értünk el, amikor például matematikai egyenletekből szeretnénk volna levezetni az emberi természet sajátosságait! Tehát még ha meg is találjuk az alapvető törvények teljes rendszerét, akkor is maradnak az előttünk álló években megoldandó, szellemi kihívást jelentő feladatok, mert ki kell dolgozni azokat az egyre tökéletesebb közelítő módszereket, amelyek használható előrejelzéseket tesznek lehetővé a bonyolult és a gyakorlati életben előforduló események lehetséges kimeneteleire vonatkozóan. A teljes, konzisztens egyesített elmélet megalkotása csak az első lépést jelenti, hiszen végső célunk a bennünket körülvevő világ és azon belül saját létezésünk teljes megértése.

TIZENKETTEDIK FEJEZET

Összefoglalás

Elképesztő világban élünk. Szeretnénk megérteni mindazt, ami körülvesz bennünket, ezért kérdéseket teszünk fel: Milyen a Világegyetem természete? Hol van benne a mi helyünk, honnan származunk, és honnan ered az egész Világegyetem? Miért olyan, amilyen?

Megpróbálva válaszolni e kérdésekre, elfogadunk valamilyen világképet. Ennek egyik változata az egymás hátán álló teknősök végtelen tornya, a tetején nyugvó lapos Földdel, de ilyen világkép a szuperhúrok elmélete is. Mindkettő a Világegyetemet leíró elmélet, bár az utóbbi sokkal inkább a matematikára épül és pontosabb az előbbinél. Mégis mindkét elméletnek hiányoznak a megfigyelési bizonyítékai. Senki sem látta még a Földet a hátán tartó óriásteknőst, de ugyanúgy senki nem látott még szuperhúrt sem. A teknősös elmélet azonban nem bizonyul jó természettudományos elméletnek, mert ennek értelmében az embereknek le kellene esniük a világ peremén. Ez az előrejelzés azonban nem egyezik a tapasztalattal, hacsak ki nem derül, hogy azokról az emberekről van szó, akik állítólag eltűntek a Bermuda-háromszögben!

A Világegyetem leírását és magyarázatát célzó legrégebbi elméleti

elképzelések szerint az eseményeket és a természeti jelenségeket emberi érzelmekkel rendelkező szellemek irányítják, akik nagyon emberi és kiszámíthatatlan módon tevékenykedtek. E szellemek ott lakoztak a természeti képződményekben, a folyókban, a hegyekben és az égtestekben, beleértve a Napot és a Holdat. Rendszeresen ki kellett engesztelni őket, és a kedvüket kellett keresni, hogy biztosítsák a föld termékenységét és az évszakok váltakozását. Elődeink azután fokozatosan észrevettek bizonyos szabályszerűségeket: a Nap mindig keleten kelt és nyugaton nyugodott le, akár bemutatott valamilyen áldozatot a napistennek, akár nem. Továbbá, a Nap, a Hold és a bolygók pontosan meghatározott pályát követtek az égbolton, amely figyelemre méltó pontossággal előre kiszámítható volt. Ettől persze még lehetett a Nap és a Hold valamilyen istenség, ám olyan istenek voltak, akik szigorú törvényszerűségeknek engedelmeskedtek, méghozzá kivétel nélkül minden esetben – legalábbis ha figyelmen kívül hagyjuk az olyan történeteket, amelyek szerint például Józsié megállította a Napot az égen.



Teknősbékáktól a görbült térig.

Ősi és modern elképzelések a világ felépítéséről.

Eleinte ezek a szabályszerűségek és törvények csak a csillagászatban és néhány más területen voltak nyilvánvalóak. Ahogy fejlődött azonban a civilizáció – különösen az utóbbi háromszáz évben –, úgy egyre több és több szabályszerűséget és törvényt fedeztek fel. E törvények sikereinek hatására jutott el Laplace a XIX. század elején a természettudományos determinizmus megfogalmazásáig. Eszerint létezik a törvényeknek egy olyan csoportja, amely pontosan meghatározza a Világegyetem

fejlődését, feltéve, hogy egy adott időpontban ismerjük a Világegyetem állapotát.

Laplace determinizmusa két szempontból sem volt teljes. Egyrészt nem mondta meg, miként kell kiválasztani a megfelelő törvényeket, másrészt nem állapította meg a Világegyetem kezdeti állapotát. Ezeket a problémákat Istenre hagyta. Szerinte tehát Isten választotta meg, milyen módon vegye kezdetét a Világegyetem fejlődése, és milyen törvényeknek engedelmeskedjék, ám miután útjára indította, többé már nem avatkozott be a fejlődésébe. Valójában Isten tevékenységét azokra a területekre korlátozta, amelyekkel a XIX. századi természettudomány nem tudott mit kezdeni.

Ma már tudjuk, hogy Laplace determinizmushoz fűzött reményei nem váltak valóra, legalábbis olyan értelemben nem, amint azt ő elképzelte. A kvantummechanika határozatlansági elvéből az következik, hogy a fizikai mennyiségek bizonyos párvai, mint például egy részecske helye és sebessége, nem határozhatók meg egyidejűleg teljes pontossággal. A kvantummechanika ezt a helyzetet a kvantumelméletek egyik változatával kezeli, amelyben a részecskéknél nincs meghatározott helyük és sebességük, hanem hullámok jelenítik meg őket. Ezek a kvantumelméletek abban az értelemben determinisztikusak, hogy megadják a hullámok időbeli fejlődését leíró törvényeket. Ha tehát egy adott pillanatban ismerjük a hullám állapotát, akkor azt bármely más időpontra is ki tudjuk számítani. Az előrejelezhetetlen, véletlenszerű elem akkor bukkan fel, amikor a részecskék helyeként és sebességeként szeretnénk értelmezni a hullámot. Ám az is lehetséges, hogy ez a mi hibánk, talán nincsenek is részecskepozíciók és sebességek, csak hullámok vannak. Vagyis csak mi akarjuk erőszakkal beilleszteni a hullámokat a helyről és a sebességről kialakított elképzeléseink közé. A két szemlélet nem fedi egymást, és ez okozza a látszólagos előrejelezhetetlenséget.

Mára újradefiniáltuk a tudomány feladatát: nevezetesen fel kell fedeznie azokat a törvényeket, amelyek lehetővé teszik számunkra, hogy a határozatlansági elv megszabta kereteken belül előre jelezzük az eseményeket. Az alapkérdés azonban továbbra is megválaszolatlan maradt: hogyan és miért születtek meg e a törvények és a Világegyetem kezdeti állapota?

Könyvünkben különös hangsúlyt fektettünk a gravitációt irányító törvényekre, mert a gravitáció alakítja a Világegyetem nagy léptékű szerkezetét, még ha ez is a leggyengébb a négy alapvető erő közül. A gravitáció törvényei összeegyeztethetetlenek azzal az egészen a közelmúltig általános vélekedéssel, amely szerint a Világegyetem időben változatlan, – minthogy a gravitáció mindig vonzó kölcsönhatás, ebből következően a Világegyetemnek vagy tágulnia, vagy összehúzódnia kell. Az általános relativitáselmélet értelmében a múltban léteznie kellett egy végtelen sűrűségű állapotnak, az Ősrobbanásnak, amely ténylegesen az idő kezdetét jelentette. Hasonlóképpen, ha az egész Világegyetem összeomlana, akkor valamikor a jövőben be kellene következnie egy másik, ugyancsak végtelen sűrűségű állapotnak, a Nagy Reccsnek^{*}, amely viszont az idő végét jelentené. Még ha maga az egész Világegyetem nem is omlana össze, egyes, fekete lyukká összeomló lokalizált tartományaiban akkor is létrejöhetnek szingularitások. Ezek a szingularitások bárki számára az idő végét jelentenék, aki beleesik a fekete lyukba. Az Ősrobbanásnál, akárcsak a többi szingularitásban az összes természeti törvény érvényét veszíti, Isten tehát teljesen szabadon megválaszthatta volna, mi történjen, miként vegye kezdetét a Világegyetem története.

Ha a kvantummechanikát egyesítjük az általános relativitáselmélettel, akkor egy új lehetőség merülhet fel, amellyel eddig nem találkoztunk. Nevezetesen a tér és az idő együttesen egy véges, négydimenziós teret alkothat, szingularitások és határok nélkül, ami olyan, mint a Föld felszíne, csak éppen több dimenzióban. Úgy tűnik, mintha ez az elgondolás a Világegyetem számos megfigyelt tulajdonságára magyarázatot tudna adni, így például annak nagy léptékű homogenitására, valamint a kisebb méretek tartományában a homogenitástól való olyan eltérésekre, mint a galaxisok, a csillagok, sőt, az emberi lények létezése. Ha viszont a Világegyetem önmagában zárt, tehát nincsenek sem szingularitásai, sem határai, továbbá maradéktalanul leírja az egyesített elmélet, akkor ennek mélyenszántó következményei vannak Isten, mint Teremtő szerepére vonatkozóan.

Einstein egyszer a következő kérdést tette fel: „Mekkora szabadsága lehetett Istennek a Világegyetem megalkotásakor?” Ha a határ

nélküli feltétel helytálló, akkor Isten egyáltalán nem választhatta meg szabadon a kezdeti állapotot. Isten természetesen ebben az esetben is szabadon megválaszthatta, milyenek legyenek a törvények, amelyeknek a Világegyetem engedelmeskedik. Ez azonban nem nevezhető igazi választásnak, hiszen nagy valószínűséggel csak egyetlen, vagy legfeljebb néhány egyesített elmélet létezik, mint például a húrelmélet, amelyek nemcsak önkonzisztensek, hanem emellett megengedik olyan bonyolult szerkezetek létrejöttét, mint amilyenek az emberi lények, akik Isten természetére vonatkozó kérdéseket fogalmaznak meg.

Még ha csak egyetlen egyesített elmélet létezik is, az nem több szabályok és egyenletek egy csoportjánál. Mi lehel életet ezekbe az egyenletekbe, és mi hozza létre az általuk leírt Világegyetemet? A szokásos természettudományos megközelítés, amikor matematikai modelleket alkotunk, nem tud arra a kérdésre válaszolni, hogy miért kell léteznie egy olyan Világegyetemnek, amelyet a megalkotott modell leír. Miért vesződik a Világegyetem a létezéssel? Talán az egyesített elmélet olyan átható erejű, hogy előidézi önmaga létezését? Vagy szükség van a Teremtőre, és ha igen, van-e Neki bármilyen befolyása a Világegyetemre? És ki teremtette Őt?

A legtöbb tudós eddig túlságosan elmélyedt azoknak az új elméleteknek a gyártásában, amelyek leírják, milyen a Világegyetem, ahelyett, hogy megkérdéznék, miért olyan. Másrészt viszont azok, akiknek a miértekkel kellene foglalkozniuk, nevezetesen a filozófusok, nem tudtak lépést tartani a természettudományos elméletek fejlődésével. A XVIII. században a filozófusok az emberiség egész tudását, a természettudományokat is beleértve saját terepüknek tekintették, és megvitattak például olyan kérdéseket, hogy volt-e a Világegyetemnek kezdete. A XIX. és a XX. században azonban a természettudomány túlságosan technikai és matematizált lett a filozófusok számára, pontosabban néhány specialista kivételével mindenki számára. A filozófusok annyira leszűkítették érdeklődési körüket, hogy Wittgenstein, a XX. század leghíresebb filozófusa így fogalmazott: „A filozófia számára már csak egyetlen feladat maradt, a nyelv elemzése.” Micsoda visszalépés ez a filozófia Arisztotelésztől Kantig ívelő nagyszerű története után!

Ha viszont mégis felfedezzük a mindenséget leíró, teljes elméletet, akkor annak nagy vonalaiban idővel nemcsak a tudósok, hanem mindenki számára érthetőnek kell lennie. Akkor mindannyian – filozófusok, természettudósok és egyszerű laikusok – képesek leszünk megvitatni, miért létezik a világ, és miért létezünk benne mi magunk. Ha ezekre a kérdésekre megtaláljuk a választ, az lesz az emberi ész végső diadala – mert akkor megismerjük Isten gondolatait.

* * *

ALBERT EINSTEIN

Einstein kapcsolata a politikával az atombomba ügyében jól ismert: ő írta alá azt a Franklin Rooseveltnél címzett híres levelet, amelyben megpróbálta meggyőzni az Egyesült Államokat, hogy vegye komolyan az elképzelést – a háború után pedig az atomháború megelőzése érdekében vett részt különféle akciókban. Ezek azonban nem egy, a politika világába berángatott, magányos tudós elszigetelt lépései voltak. Einstein saját szavait idézve, életét „megosztotta a politika és az egyenletek között”.

Einstein első politikai színre lépése még az első világháború alatt történt, amikor egyetemi tanár volt Berlinben. Elborzadt az emberi életek hiábavaló pusztítása láttán, ezért különböző háborúellenes megmozdulásokon vett részt. Támogatta a polgári engedetlenséget és a nyilvánosság előtt a katonai szolgálat megtagadására buzdított, amivel a legkevésbé sem tette magát kedveltté kollégái szemében. A háborút követően a béke újbóli megteremtése és a nemzetközi kapcsolatok fejlesztése érdekében tevékenykedett. Ez sem tette őt túlságosan népszerűvé, olyannyira, hogy hamarosan már akkor is nehézséget okozott számára beutazni az Egyesült Államokba, amikor csak előadásokat akart tartani.

Einstein politikai aktivitásának második nagy területe a cionizmus volt. Bár származását tekintve zsidó volt, mégis elvetette Isten Biblia szerinti fogalmát. Amikor azonban érzékelte az antiszemitizmus erősödését az első világháború előtt és alatt, akkor egyre inkább azonosult a zsidó közösséggel, és később a cionizmus aktív támogatójává vált. A népszerűtlenség ezúttal sem tett lakatot a

szájára. Elméleteit támadták, még egy Einstein-ellenes szervezetet is létrehoztak. Egy embert el is ítélték, mert másokat arra buzdított, hogy gyilkolják meg Einsteint (bár a büntetés mindössze hat dollár volt). Einstein közönyösen vette tudomásul mindezt. Amikor megjelent a Száz szerző Einstein ellen című kötet, így vágott vissza: „Ha nem lenne igazam, egy is elég lenne!”

1933-ban Hitler hatalomra jutott. Einstein éppen Amerikában volt, ahol bejelentette, hogy nem kíván visszatérni Németországba. Ezután, miközben a náci rendőrség feldúlta a házát és lefoglalta a bankszámláját, az egyik berlini újság a következő szalagcímmel jelent meg: „Jó hírek Einsteinról – nem jön vissza”.

A náci fenyegetéssel szembenező Einstein ekkor elutasította a pacifizmust, majd attól tartva, hogy a német tudósoknak esetleg sikerül megépíteni az atombombát, azt javasolta, hogy az Egyesült Államok fejlessze ki a sajátját. Ám még mielőtt az első atombomba felrobbant volna, nyilvánosan figyelmeztetett a nukleáris háború veszélyeire és az atomfegyverek fölötti nemzetközi ellenőrzés bevezetését sürgette.

Einstein egész életén át tartó erőfeszítései a béke érdekében alig hoztak eredményeket – és természetesen ezekkel csak kevés barátot szerzett magának. A cionizmus melletti kiállását azonban 1952-ben illő módon elismerték, amikor felajánlották neki Izrael állam elnöki tisztét. Einstein elhárította a megtisztelő felkérést, mondván, hogy túlságosan naivnak tartja magát a politikához. De talán a valóságos indoka valami más lehetett. Ismét az ő szavait idézve: „Az egyenletek fontosabbak számomra, mert a politika csak a jelennek szól, az egyenletek viszont az örökkévalóságnak.”

GALILEO GALILEI

A modern természettudomány születésében talán mindenki másnál nagyobb szerepe volt Galileo Galileinek. Közismert összeütközése a katolikus egyházzal világnézetének központi elemét alkotta, mivel Galilei volt az egyik első tudós, aki azt hirdette, hogy remélhetjük a világ működésének megértését, sőt, e megismerési folyamatnak a valóságos világ megfigyelése útján mi magunk is aktív részesei lehetünk. Galilei kezdettől fogva elfogadta

Kopernikusz elméletét (mely szerint a bolygók a Nap körül keringenek), ám ezt a nyilvánosság előtt csak akkor ismerte el, amikor rátalált az elméletet alátámasztó bizonyítékokra. Kopernikusz elméletéről olaszul írt (nem pedig a tudományos körökben általánosan használt latin nyelven), így nézeteit hamarosan az egyetemeken kívül is megismerték. Ez bosszantotta az Arisztotelész tanait valló professzorokat, akik összefogtak ellene, és megpróbálták meggyőzni az egyházat, hogy tiltsa be Kopernikusz nézeteinek terjesztését.

Galilei, aggódva emiatt, Rómába utazott, hogy személyesen találkozzék az egyházi hatóságok képviselőivel. Azzal érvelt, hogy a Szentírásnak nem célja az, hogy természettudományos elméletekről szóljon, továbbá hogy amikor a Szentírás ellentétbe kerül a józan ésszel, akkor azt csak allegorikus jelentőségűnek kell tulajdonítani.

Az egyház azonban tartott a botránytól, ami alááshatta volna a protestantizmus ellen folytatott harcát, ezért korlátozó intézkedéseket foganatosítottak. Kopernikusz tanait 1616-ban „hamisnak és tévesnek” nyilvánították, és arra utasították Galileit, hogy a továbbiakban ne „védelmezze vagy támogassa” ezeket a tanokat. Galilei beletörődött az ítéletbe.

1623-ben Galilei régi jó barátja lett a pápa. Galilei azonnal megpróbálta az 1616-os rendeletet hatályon kívül helyeztetni. Ez nem sikerült, két feltétellel sikerült viszont engedélyt kapnia egy könyv megírására, amelyben Arisztotelész és Kopernikusz elméletét akarta összehasonlítani. Az első feltétel értelmében szerzőként nem foglalhatott állást a vitában. A második feltétel szerint arra a következtetésre kellett jutnia, hogy az ember semmilyen körülmények között nem képes megállapítani, miként működik a világ, mert Isten ugyanazokat a hatásokat sokféleképpen, az ember által el nem képzelhető módokon is képes előidézni, és az ember nem korlátozhatja Isten mindenhatóságát.

A Párbeszéd a két legnagyobb világrendszerrel [Dialogo] című könyv 1632-re készült el, és még abban az évben meg is jelent – a cenzorok szükséges engedélyeivel. A művet szerte Európában azonnal lelkesen fogadták, irodalmi és filozófiai mesterműként méltatták. A pápa hamarosan megbánta, hogy engedélyezte a könyv kiadását, mert rájött, hogy az olvasók a kopernikuszi nézetek mellett

szóló meggyőző érvelésnek tekintik. Ezért a pápa arra hivatkozott, hogy bár a könyvre a cenzorok hivatalosan áldásukat adták, mindazonáltal Galilei megszegte az 1616-ban hozott rendeletet. Ezért Galileit az inkvizíció elé idézte, amely életfogytig tartó házi őrizetre ítélte, és elrendelte, hogy nyilvánosan tagadja meg a kopernikuszi nézeteket. Galilei másodszor is beletörődött az ítéletbe. Galilei élete végéig hithű katolikus maradt, de ettől még megmaradt a tudomány függetlenségébe vetett hite. Négy évvel 1642-ben bekövetkezett halála előtt, amikor még mindig házi őrizetben volt, egy második jelentős könyvének a kéziratát sikerült Hollandiába csempészni, és ott kiadni. Ez volt a Két új tudomány című munka, amellyel Galilei még a kopernikuszi nézetek alátámasztásánál is nagyobb mértékben hozzájárult a modern természettudomány megszületéséhez.

ISAAC NEWTON

Isaac Newton nem volt kellemes ember. Hírhedt volt a többi tudóshoz fűződő rossz viszonya, és élete jelentős részét köztudottan elkeseredett szakmai veszekedésekkel töltötte. A *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* – kétségkívül a fizika történetének legnagyobb hatású könyve – megjelenését követően Newton rövid időn belül a közérdeklődés középpontjába került. Kinevezték a Royal Society elnökének, és ő volt az első természettudós, aki lovagi címet kapott.

Newton hamarosan összeütközésbe került John Flamsteeddel, a királyi csillagással, aki korábban átadott neki olyan adatokat, amelyekre nagy szüksége volt a *Principia* megírásához, később azonban visszatartott bizonyos információkat, amelyeket Newton ugyancsak meg akart volna szerezni. Newton képtelen volt elfogadni a „nem” választ, inkább kineveztette magát a Royal Observatory igazgatótanácsába, és megpróbálta így kikényszeríteni a szóban forgó adatok azonnali publikálását. Végül úgy intézte az ügyeket, hogy Flamsteed munkáját annak halálos ellensége, Edmond Halley rendezze és készítse elő publikálásra. Flamsteed azonban bíróság elé vitte az ügyet, és sikerült kieszközölnie egy bírósági ítéletet, amely megakadályozta az ellopott adatok terjesztését. Ez

felbőszítette Newtont, aki minden áron elégtételt akart venni: a Principia későbbi kiadásából a Flamsteed-re történő összes hivatkozást kitörölte.

Még komolyabb vitája támadt Gottfried Leibniz német filozófussal. Leibniz és Newton egymástól függetlenül kidolgozták a matematika differenciál- és integrálszámításnak nevezett ágát, amely nélkül elképzelhetetlen a modern fizika. Ma már tudjuk, hogy Newton évekkel Leibniz előtt felfedezte a differenciál- és integrálszámítást, azonban csak jóval később publikálta munkáját. Heves vita bontakozott ki az elsőség kérdéséről, amelybe sok tudós kapcsolódott be egyik vagy a másik fél oldalán. Figyelemre méltó azonban, hogy a Newton védelmében született cikkek eredetileg mind Newton kézírásával készültek, bár később különböző barátai neve alatt jelentek meg! Ahogy terebélyesedett a vita, Leibniz elkövette azt a hibát, hogy a Royal Societyhez fordult döntésért. Newton, mint a Társaság elnöke, egy „pártatlan” bizottságot nevezett ki az ügy vizsgálatára, ám a bizottság véletlenül kivétel nélkül az ő barátaiból állt. Ez azonban még nem volt minden: Newton ezután saját maga írta meg a bizottság jelentését, amelyet azután a Társasággal adatott ki, és amelyben Leibnizet hivatalosan is plágiummal vádolta. Ezzel még mindig nem volt elégedett, ezért a bizottság jelentéséről név nélkül ismertetést írt és jelentetett meg a Royal Society saját folyóiratában. Leibniz halálát követően Newton állítólag kijelentette, hogy nagy megelégedéssel vette tudomásul, hogy Leibniznek megszakadt a szíve.

Miközben tartott ez a két vita, Newton már elhagyta Cambridge-et és az egyetemet. Már egy ideje aktívan kivette a részét a katolikusellenes politizálásból, előbb Cambridge-ben, később a Parlamentben. Szolgálataiért később jövedelmező állást kapott, ő lett a Királyi Pénzverde igazgatója. E pozíciójában cselszövő és kíméletlen módszereit társadalmilag sokkal elfogadhatóbb célok érdekében kamatoztathatta. Sikeres kampányt folytatott a pénzhamisítók ellen, több embert akasztófára juttatott.

abszolút nulla fok: a lehetséges legalacsonyabb hőmérséklet, amelyen az anyagoknak nincs hőenergiájuk. [Értéke körülbelül -273 Celsius-fok, a Kelvin-féle hőmérsékleti skála 0 pontja (0 K).]

általános relativitáselmélet: Einstein elmélete, amely azon elgondoláson alapul, hogy a fizika törvényeinek minden megfigyelő számára ugyanolyanoknak kell lenniük, függetlenül attól, miként mozognak a megfigyelők. A gravitációs erőt a négydimenziós téridő görbületével magyarázza.

antirészecske: az anyag minden elemi részecskéjének van egy antirészecskepárja. Ha valamely részecske összeütközik saját antirészecskéjével, annihilálódnak (szétsugárzódnak), csak energia marad a nyomukban.

antropikus elv: azon elképzelés, mely szerint a Világegyetem azért olyan, amilyennek látjuk, mert ha más lenne, akkor nem létezhetnének benne olyan lények, akik képesek megfigyelni.

arányosság: „x (egyenesen) arányos y-nal” azt jelenti, hogy ha x-et egy tetszés szerinti számmal megszorozzuk, akkor y is ugyanennyiszeresére nő. Ha viszont „x fordítottan arányos y-nal”, akkor ahányszorosára nő x, annyiad részére csökken y.

atom: a közönséges anyag alapvető alkotórésze, amelyik a parányi (protonokból és neutronokból álló) atommagból, valamint a körülötte keringő elektronokból épül fel.

atommag: az atom központi része, amelyet az erős kölcsönhatás által összetartott protonok és neutronok alkotnak.

dualitás: látszólag különböző, de ugyanazon fizikai eredményre vezető elméletek közötti párhuzam.

Einstein-Rosen-híd: két fekete lyukat összekötő, vékony cső a téridőben. Lásd még: féreglyuk.

elektrogyenge egyesítési energia: azon energia (mintegy 100 GeV), amelynél eltűnik az elektromágneses erő és a gyenge kölcsönhatás közötti különbség.

elektromágneses erő: az az erő, amely két elektromos töltés között ébred, – a négy alapvető kölcsönhatás közül a második legerősebb.

elektromos töltés: a részecskének azon tulajdonsága, amelynek következtében más részecskéket taszítani (vonzani) képesek, ha azok töltése azonos (ellentétes) előjelű az övével.

elektron: negatív töltésű részecske, amelyik az atommag körül

kering.

elemi részecske: olyan részecske, amelyet legjobb tudomásunk szerint nem lehet alkotórészeire bontani.

erős kölcsönhatás: a négy alapvető fizikai kölcsönhatás közül a legerősebb, de egyben a legrövidebb hatótávolságú. Összetartja a protonokat és a neutronokat felépítő kvarkokat, valamint a protonokat és neutronokat atommaggá egyesíti.

esemény: a téridő egy pontja, amelyet helye és időpontja határoz meg.

eseményhorizont: a fekete lyuk pereme [azon tartomány határfelülete, amelyből nem lehetséges kiszökni a végtelenbe.]

fázis: hullám esetében a cikluson belüli pozíció egy adott időpontban: annak a mértéke, hogy a hullám éppen mely szakaszánál tart, hullámhegynél, hullámvölgyben vagy valahol a kettő között.

fekete lyuk: a téridő olyan tartománya, amelyet semmi, még a fény sem képes elhagyni, olyan erős a gravitációs tere.

fénymásodperc (fényév): az a távolság, amelyet a fénysugár egy másodperc (egy év) alatt befut.

féreglyuk: vékony cső a téridőben, amely a Világegyetem távoli részei között közvetlen kapcsolatot teremt. A féreglyukak párhuzamosan létező csecsemő-világegyetemeket is összeköthetnek, és lehetővé tehetik az időutazást.

foton: a fény kvantuma, az elektromágneses tér lehetséges legkisebb energiacsomagja.

frekvencia: hullám esetében a másodpercenként végbemenő ciklusok száma.

gamma-sugárzás: nagyon rövid hullámhosszú elektromágneses sugárzás, amely radioaktív bomlás vagy elemi részecskék összeütközése során keletkezik.

geodetikus vonal: két pont közötti legrövidebb útvonal.

gyenge kölcsönhatás: a négy alapvető kölcsönhatás közül a második leggyengébb, hatótávolsága nagyon rövid. Minden anyagi részecskére hatással van, a kölcsönhatásokat közvetítő részecskékre azonban nem.

gyorsulás: a testek sebességének időegység alatti megváltozása. [Akár a sebesség nagysága, akár iránya (vagy mindkettő) változik

meg, gyorsulásról beszélünk.]

határ nélküli feltétel: azon elképzelés, mely szerint a Világegyetem véges, de nincs határa.

határozatlansági elv: Heisenberg által megfogalmazott alapelv, melynek értelmében nem lehet egy részecske helyét és sebességét egyidejűleg pontosan meghatározni. Minél pontosabban ismerjük az egyik mennyiséget, annál pontatlanabban határozhatjuk csak meg a másikat.

hullámhossz: egy hullámon belül két szomszédos hullámhegy vagy két szomszédos hullámvölgy távolsága.

hullám-részecske kettősség: a kvantummechanika egyik alapfogalma, mely szerint nincs különbség a hullámok és a részecskék között, – a részecskék képesek hullámként viselkedni, és megfordítva.

húrelmélet: fizikai elmélet, amelyben az elemi részecskéket húrok rezgéseiként írjuk le. A húroknak hosszuk van, további dimenzióik azonban nincsenek.

koordináták: egy pont térbeli és időbeli helyzetét meghatározó számok.

kozmológia: a Világegyetem egészét tanulmányozó tudományág.

kozmológiai állandó: matematikai segédeszköz, amelynek segítségével Einstein be akarta építeni egyenleteibe a Világegyetem tágulásra való hajlamát [és ezáltal lehetővé tenni, hogy az általános relativitáselmélet egyenletei statikus Világegyetemet adjanak eredményül].

kvantummechanika: Planck kvantumelvéből és a Heisenberg-féle határozatlansági relációból kiindulva kifejlesztett elmélet.

kvark: töltött elemi részecske, amelyekre hat az erős kölcsönhatás. A protonok és a neutronok egyaránt három-három kvarkból épülnek fel.

magfúzió: azon folyamat, melynek során két atommag összeütközik, és nagyobb, nehezebb atommaggá egyesül.

mágneses mező (mágneses tér): a mágneses erő fellépéséért felelős fizikai mező, jelenleg a az elektromos térrel egyesítve, elektromágneses térként tárgyalja a fizika.

mező (tér, erőter): olyan valami, ami a teret és az időt kitöltve létezik, szemben a részecskékkel, amelyek egy időpontban csak

egyetlen helyen létezhetnek.

mikrohullámú háttérsugárzás: a Világegyetem korai, ősi, forró állapotából származó sugárzás, amely mára már oly mértékű vöröseltolódást szenvedett, hogy nem fénynek, hanem mikrohullámú sugárzásnak (azaz néhány centiméter hullámhosszú rádióhullámoknak) észleljük.

nagy egyesített elmélet (GUT, Grand Unified Theory): fizikai elmélet, amely egyesíti az elektromágneses, az erős és a gyenge kölcsönhatást.

Nagy Reccs: a Világegyetem történetének végét jelentő szingularitás. [A Világegyetem története egyik lehetséges végkimenetelének az elnevezése. Bekövetkeztekor az egész tér és minden anyag egyetlen szingularitássá omlik össze.]

neutrínó: töltés nélküli, rendkívül kis tömegű részecskefajta, amelyre csak a gyenge kölcsönhatás és a gravitáció hat.

neutron: töltés nélküli elemi részecske, nagyon hasonló a protonhoz, – az atommagot alkotó részecskék mintegy fele neutron.

neutroncsillag: a szupernóva-robbanás után néha visszamaradó, hideg csillag. Szupernóva-robbanáskor a csillag magját alkotó anyag neutronokból álló sűrű masszává omlik össze.

Ősrobbanás (Nagy Bumm): a Világegyetem történetének [mintegy 15 milliárd évvel ezelőtti] kezdetét jelentő szingularitás.

Planck-féle kvantumelv: azon elmélet, mely szerint az elektromágneses hullámok (például a fény) csak diszkrét energiacsomagok, az úgynevezett kvantumok formájában sugározhatók ki vagy nyelhetők el. A kvantumok energiája fordítottan arányos a hullámok hullámhosszával.

pozitron: az elektron pozitív töltésű antirészecskéje.

proton: pozitív töltésű elemi részecske, nagyon hasonló a neutronhoz. Az atommagot alkotó részecskék mintegy fele proton.

radar: tárgyak helyének meghatározására rádióhullámok impulzusait használó rendszer. A rendszer megméri, mennyi idő alatt érkeznek vissza a kibocsátott, és a céltárgyról visszaverődő rádióimpulzusok, és ebből számítja ki a tárgy távolságát.

radioaktivitás: egy bizonyos fajta atom spontán átalakulása valamilyen más atommá.

részecskegyorsító: mozgó, elektromos töltést hordozó elemi

részecskéket elektromágneses tér segítségével felgyorsító, és így azok energiáját növelő berendezés.

sötét anyag: a galaxisokban, a galaxishalmazokban és valószínűleg azok között is található anyag, amely közvetlenül nem figyelhető meg, gravitációs hatása azonban kimutatható. A Világegyetem anyagának nem kevesebb mint 90 százaléka sötét anyag.

speciális relativitáselmélet: Einstein elmélete, amely azon az elgondoláson alapul, miszerint gravitációs tér nélkül a természet törvényeinek az egymáshoz egyenes vonalú egyenletes mozgást végző összes megfigyelő számára ugyanolyanoknak kell lenniük.

súly: valamely testre a gravitációs tér által kifejtett erő. Arányos a test tömegével, de a súly és a tömeg két alapvetően különböző fizikai mennyiség, nem azonosak egymással.

szingularitás: a téridő egy pontja, ahol a téridő görbülete (vagy valamilyen más fizikai mennyiség) végtelenné válik.

színkép (spektrum): egy hullámot felépítő, összetevő frekvenciák összessége. A Nap színképének látható része néha szivárvány formájában figyelhető meg.

térbeli dimenzió: a téridő három térszerű dimenziójának bármelyike, vagyis az idő kivételével a téridő bármely dimenziója.

téridő: négydimenziós tér, amelynek pontjai az események.

tömeg: valamely testet alkotó anyag mennyisége, – illetve a szabad térben a gyorsulással szemben mutatott ellenállásának, ún. tehetetlenségének a mértéke.

virtuális részecske: a kvantummechanikában olyan részecske, amely közvetlenül soha nem mutatható ki, ám létezésének mérhető hatásai vannak.

vöröseltolódás: egy a megfigyelőtől távolodó forrás által kibocsátott sugárzás látszólagos vörösebbé válása a Doppler-jelenség következtében.

A szerzők

Stephen Hawking a Cambridge-i Egyetemen a matematika Lucas-professzora. További ismeretterjesztő könyvei közé tartozik a Black Holes and Baby Universes című tanulmánygyűjtemény valamint A Világegyetem dióhéjban.

Leonard Mlodinow fizikus, korábban a Kaliforniai Műszaki Egyetemen (Caltech) tanított, és bedolgozott a Star Trek – The Next Generation című filmsorozatba. Magyarul is megjelent ismeretterjesztő könyvei az Eukleidész ablaka és a Feynman szivárványa. Emellett a gyerekeknek szóló, The Kids of Einstein Elementary című könyvsorozat társszerzője.

Tartalom

- [Előszó](#)
- [Gondolokodás a Világegyetemről](#)
- [Világképünk fejlődése](#)
- [A tudományos elméletek természete](#)
- [Newton Világegyeteme](#)
- [Relativitáselmélet](#)
- [Görbült tér](#)
- [A táguló Világegyetem](#)
- [Ősrobbanás*, fekete lyukak](#)
- [Kvantumgravitáció](#)
- [Féreglyukak és időutazás](#)
- [A természet erői és a fizika egyesítése](#)
- [Összefoglalás](#)
- [ALBERT EINSTEIN](#)
- [GALILEO GALILEI](#)
- [ISAAC NEWTON](#)
- [Kislexikon](#)
- [A szerzők](#)