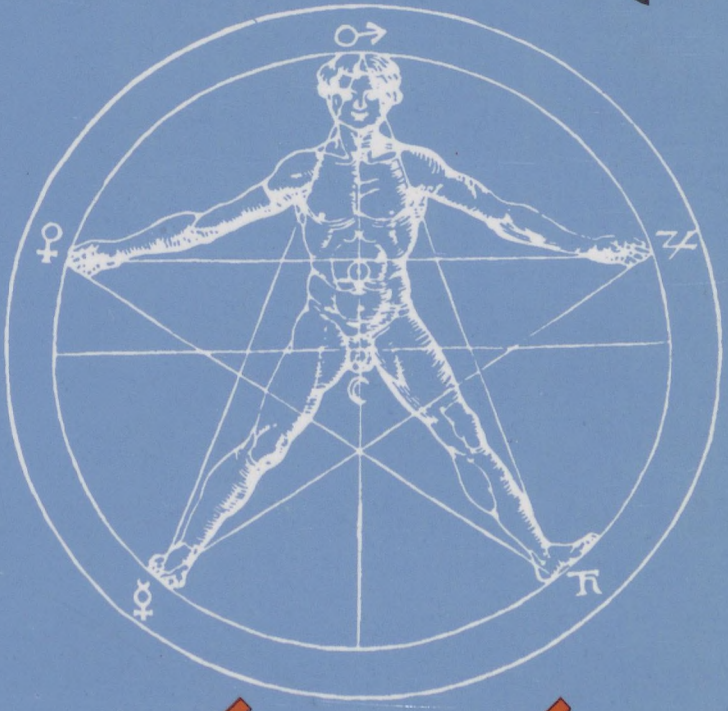
John D. Barrow

A FIZIKA VILÁGKÉPE



Akadémiai Kiadó, Budapest

A fizika világképe

Készült
a Magyar Könyv Alapítvány
támogatásával

83819

John D. Barrow

A fizika világképe

MTAK 0 00036 59300 2

Akadémiai Kiadó · Budapest

699219

A fordítás az alábbi kiadás alapján készült:
John D. Barrow: *The World within the World.*
Oxford University Press, 1990

Fordította:
Fejes Erzsébet és Menczel László

Lektorálta:
Fehér Márta

MAGYAR
TUDOMÁNYOS AKADÉMIA
KÖNYVTÁRA

ISBN 963 05 6808 X

Kiadja az Akadémiai Kiadó
1117 Budapest, Prielle Kornélia u. 19–35.
Első magyar nyelvű kiadás: 1994 © Akadémiai Kiadó

© John D. Barrow, 1988
Hungarian translation © Fejes Erzsébet, Menczel László, 1994

Minden jog fenntartva, beleértve a sokszorosítás,
a nyilvános előadás, a rádió- és televízióadás jogát,
az egyes fejezeteket illetően is

Printed in Hungary

M. TUD. AKADÉMIA KÖNYVTÁRA
Könyvleltár 282/19 95. sz.

Loisnak és Louise-nak

699219

A fordítás az alábbi mű alapján készült:
John D. Barrow: *The World within the World*
Oxford University Press, 1990

Fordította:
Fejes Erzsébet és Menczel László

Lektorálta:
Fehér Márta

ISBN 963 05 6808 X

Kiadja az Akadémiai Kiadó
1117 Budapest, Prielle Kornélia u. 19–35.
Első magyar nyelvű kiadás 1994 © Akadémiai Kiadó

© John D. Barrow, 1988
Hungarian translation © Fejes Erzsébet, Menczel László, 1994

Minden jog fenntartva. Beleértve a sokszorosítás,
a nyilvános előadás, a rádió- és televízióadás jogát,
az egyes fejezetekre illetően is

Printed in Hungary

M. TUD. AKADÉMIA KÖNYVTÁRA
Könyvtári ... sz.

Tartalomjegyzék

A szerző előszava 13

1. Prológus 17

Bevezetés 17
Előrelátásra és ellenőrzésre ösztönzés 19
Az előrejelezhetőség paradoxonja 22
A külső világ: első megközelítés 24
Leírás vagy előírás? 26
A különböző tudományszemléletek 28
Érvek és ellenérvek 31
Címkék 39
Véletlenszerű, jogi és statisztikai törvények 41
Érthetőség 45

2. Régmúlt idők 49

Kezdetek 49
Társadalmi és vallási előzmények 54
A kínai tudomány 59
A görögök 63
Platón 70
Arisztotelész 76
Arisztotelész mozgástörvényei 82
Az arisztotelészi örökség 84
Természeti törvények és szabályok 87
Newton, követői és a newtonianizmus 91
A világ ésszerűsége 110
Darwin törvényei 117

3. Nem látható világok 121

Mechanizmus nélküli mechanizmus 121
Erőterek 122
Elektromosság és mágnesesség 126
A sandemani világkép 131
A szemléletesség alkonya? 133
Matematikai modellezés 134
A tér és az idő összefonódnak 137
Görbült téridő 144
Invariancia 151
Szimmetria 155
A véletlen törvényei 158
Termodinamika 164
Rendetlen íróasztalok 169
Démonok munkában 171
Az örök visszatérés 174
Kvantumtörvények: természet az Édentől keletre 176
Szkizofrén anyag 177
Belső bizonytalanság 182
A véletlen hullámai 187
A kvantumvalóság természete 190
Az „EPR-paradoxon" 191
Az őrületesen összekevert macska 198
Kvantum-macskafóbia 200
Hány világra van szükségünk? 202
A kvantumtörvényhozás 206

4. Külső és belső tér 209

A díszletek elhelyezése 209
Világ a világban 211
Az atom felboncolása 221
Szép új világ 224
Vérfertőző anyag? 225
Kvarkok 227
Kvantumterek 229
A belső tér alaptörvényei 232
Egyesítés 237
Egy új dimenzió 244

Miért három térbeli dimenzió létezik? ... 247
Melyek az anyag végső építőkövei? ... 249
A belső tér hitvallása ... 253
Külső tér ... 255
A kozmológia egyedülálló volta ... 258
Az elmélet céljai ... 267
Az állandó állapotú *(steady state)* világegyetem képviselőinek öröksége ... 270
Kaotikus kozmológia ... 273
Infláció ... 277
Az inflációs „paradigma" ... 280
A jövő ... 282
Teremtés a semmiből? ... 288
Kozmológia és a törvény ... 296
Az idő természete ... 297
Hová lett a sok dimenzió? ... 300

5. Miért matematikai természetűek a természeti törvények? ... 302

Egy rejtély ... 302
Mi a matematika? ... 304
A formalistákat ért megrázkódtatás ... 323
Következmények a fizika tudományára nézve ... 326
Mi az igazság? ... 330
Kiszámíthatóság ... 332
Eredendően nehéz problémák ... 336
A tudatlanság dilemmája ... 343
Maxwell a determinizmusról ... 343
Káosz ... 350
Egyenletek ... 352
Törvény nélküli törvény ... 355
Kiszámíthatók-e a természet törvényei? ... 364
A kozmikus kód – egy végső spekuláció ... 367

6. Léteznek-e természeti törvények? ... 369

Eretnek nézetek ... 369
Két tűz között ... 372
Túl sok törvény? ... 376
Spontán rend ... 378

Meghaladja-e az élet a természeti törvényeket? ... 380
Véletlen szimmetriák ... 383
Ahol megdőlnek a természeti törvények ... 385
A fekete lyukak egyedfejlődése ... 389
Kozmikus cenzúra ... 393
Kutathatunk-e szingularitást? ... 397
Szaggatott idő ... 398
Természeti állandók ... 401
Súlyok és mértékek ... 405
Változó állandók? ... 407
Új dimenziókra nyíló ablak? ... 410

7. Kiválasztási hatások ... 412

Mintázatok ... 412
A laboratórium fantomja ... 420
Hibák ... 422
A „Groucho Marx-effektus" ... 426
Szépség ... 430
Az antropikus elv ... 438
Véletlen egybeesések ... 444
A spekulatív antropikus elv ... 446
Az élet és a megfigyelők ... 447
Isten léte mellett szóló érv-e az antropikus elv? ... 451
Életünk ideje ... 454
A mizantrópok ... 457

Válogatott irodalomjegyzék ... 465

Az ábrák forrásai ... 475

Mindezt nem látta senki még –
Ám tudósaink szüntelen
Bizonygatják: így kell legyen...
Soha ne kétkedjünk tehát
Abban, mit senki át nem lát!

Hilaire Belloc

A művészet hazugság,
amely segít felismerni az igazságot.

Pablo Picasso

Az írás művészete az illesztés művészete:
a nadrág feneke illesztendő a szék ülőkéjéhez.

Mary Heaton Vorse

Meghaladja-e az élet a természeti törvényeket? ... 380
Véletlen szimmetriák ... 383
Ahol megdőlnek a természeti törvények ... 385
A fekete lyukak egyedfejlődése ... 389
Kozmikus cenzúra ... 393
Kutathatunk-e szingularitást? ... 397
Szaggatott idő ... 398
Természeti állandók ... 401
Súlyok és mértékek ... 405
Változó állandók ... 407
Új dimenziókra nyíló ablak? ... 410
7. Kiválasztási hatások ... 412
Mintázatok ... 412
A laboratórium fantomja ... 420
Hibák ... 422
A „Groucho Marx-effektus" ... 426
Szépség ... 430
Az antropikus elv ... 438
Véletlen egybeesések ... 444
A spekulatív antropikus elv ... 446
Az élet és a megismerés ... 447
Isten léte mellett ... 451
Életünk ideje ... 454
A mizantropológia ... 457
Válogatott irodalomjegyzék ... 465
Az ábrák forrásai ... 475

A szerző előszava

Az utóbbi években jelentősen megemelkedett az úgynevezett „népszerű tudományos" kiadványok száma. Tekintet nélkül arra, hogy szerzőiken kívül bárki másnál is népszerűségre tettek-e szert, közös céljuk az volt, hogy az elmúlt évtizedben az alaptudományokból kiáramló új eszméket és felfedezéseket egyszerű nyelven magyarázzák meg. E könyv célja nem csupán az, hogy ismét kiválassza és hétköznapi nyelven megmagyarázza az alaptudományok határvidékének egy titokzatos területét, hanem inkább az, hogy rámutasson azokra a hagyományos, ki sem mondott feltevésekre, amelyeknek mindezeket az elvont és gyakorlati fejleményeket köszönhetjük: arra, hogy a világegyetem rendezett, logikus, matematikai természetű és kiszámítható, s hogy valami rajtunk kívül álló kormányozza, ami mindenhol és mindenkor ugyanaz, mégis határozottan összecseng saját elménk működésével; arra irányul, hogy felderítsük annak a gondolatnak az eredetét és lehetséges jelentéseit, mely szerint léteznek „természeti törvények", és azokról a nem is sejtett birodalmakról ad képet, ahová ez a gondolat vezetett. Ez a nyomozás a történelem előtti kortól kezdve végigvezet az alapvető fizikai tudományok és az azokat kísérő, segítségükkel életre hívott filozófia kulcsfogalmainak fejlődésén. Újra és újra régi kérdésekhez vezet majd vissza bennünket, amelyek új köntösben jelentkeznek: a belső és külső tér láthatóvá nem is tehető világában kiterjesztve, elmélyítve és középpontba helyezve, ahol a természet logikáját leleplezi az az egyszerűségnek álcázott bonyolultság, amelyet minden természeti jelenség fémjeleként ismertünk fel. Valóban léteznek természeti törvények, gondolkozásunktól függetlenül, csak arra várva, hogy felfedezzük őket, vagy pusztán a már leírható dolgok leírásának legkényelmesebb módjai? A természeti törvények mindenütt ugyanazok-e? Vannak-e olyan helyek, ahol már nem érvényesek? Időben változhatnak-e? Sőt mi több, lehetséges-e, hogy természeti törvények egyáltalán nem is léteznek? A matematika nyelve miért képes olyan jól kifejezni a világegyetem működését? Mi a jelentősége saját létezésünknek abból a szempontból, hogy miképpen értelmezzük a világegyetem szerkezetét? Elegendő-e intellektuális képességünk arra, hogy megértsük a természet összhangja és bonyolultsága mögött rejlő legmélyebb elveket?

Az ilyenfajta kérdések régebben a filozófusok kizárólagos fennhatósága alá tartoztak, az utóbbi években azonban a fizikusokat és kozmológusokat elméleteik olyan vidékekre vezették, ahol az afféle rendkívüli találós kérdéseknek, mint például „Lehet-e semmiből világegyetemet teremteni?", mérhető mennyiségeket érintő következményei lehetnek. Azok a hagyományos dogmák, amelyek meghatározzák, hogy milyen követelményeknek kell egy gondolatkörnek megfelelnie ahhoz, hogy „tudománynak" minősülhessen, az emberi vállalkozástól távol eső problémákkal és kutatásokkal szembekerülve ma már furcsamód alkalmatlannak látszanak. Egyes tudósok úgy gondolják, hogy új filozófiai kérdések valójában évszázadok óta csak az új tudományos felfedezések nyomán merültek fel. Mások számára a „filozófiai kérdések" alkalmas címkévé vált a határozatlan vagy látszólag megválaszolhatatlan kérdések megjelölésére, amelyek csak akkor érdemelnek komolyabb megfontolást, ha már tudományos tétellé minősítették őket. Ez az előítélet gyakran együtt jár azzal a nézettel, mely szerint a legújabb kori filozófia célja csak annak megmutatása volt, hogy a filozófia legtöbb múltbeli „problémája" nem egyéb, mint megtévesztő szemantikai zűrzavar. Reméljük, hogy a természet működésének szokatlan módozatai újra felébresztik a filozófusok érdeklődését a tudományos problémák jelentőségének vizsgálata iránt, hogy ők majd sokkal kevésbé veszik komolyan ama tudományfilozófusok különös nézeteit, akik – miután helyesen felismerték, hogy a tudománynak van szociológiája – helytelenül arra a következtetésre jutottak, hogy a tudomány nem más, mint a tudósok társadalmának tűnő divathóbortja.

Manapság divatos dolog azt hinni, hogy a természeti törvények szükségesek és egyszersmind elégségesek is annak magyarázatára, amit a világegyetemben látunk, s ezért valamilyen nagyszabású „minden létező elmélete" minden kozmológiai kérdésünkre választ ad majd. E mű egyik mondanivalója éppen az, hogy bár a természeti törvényekre szükség lehet az ilyen nagy léptékű magyarázatokhoz, semmi esetre sem elégségesek mindannak magyarázatához, amit látunk. Kezdeti feltételek, megbontott szimmetriák, szervező elvek, kiválasztási hatások és a gondolkodás emberi kategóriái mind-mind lényeges és nem kisebbíthető módon hozzájárulnak minden egyes természeti törvényhez, amelynek segítségével meghatározni igyekszünk világegyetemünk képét.

E könyv lapjain személyes és csak egyes részletekre kiterjedő kép rajzolódik ki. A mű félig ismeretterjesztő jellegű, részrehajló a matematikai és fizikai tudományok irányában. Nem állítja, hogy teljes. Tulajdonképpen máris túl hosszú némelyek ízlése szerint. Nem hirdet evangéliumot, nem ígér új beállítást, csak egy hézagos történetet akar elmondani. A kortárs problémákat előmeneteli jelentés formájában vitatja meg, a pillanatnyi eszmékből elvi

pontokat próbálva kiemelni, és mérni is e szerény mércével kell. Ha ugyanis egy könyvet nem a megfelelő mércével mérnek, abból kétségkívül nagy zűrzavar származik, gondoljunk csak arra a rosszalló kritikára, amely az amerikai „Mezők és patakok" című vadász-, sportlövő- és horgászmagazin hasábjain jelent meg a *Lady Chatterley szeretője* című regényről. Eszerint „egy angol vadőr mindennapi életének e festői leírása méltán tart igényt a szabad ég alatti életet kedvelő olvasó érdeklődésére, mert sokat foglalkozik a fácánneveléssel, a vadorzók lefülelésével, az élősdiek féken tartásának módszereivel, valamint a hivatásos vadőr egyéb feladataival és kötelességeivel. Sajnálatos módon az embernek sok-sok oldalnyi oda nem tartozó anyagon kell átrágnia magát ahhoz, hogy felfedezhesse és élvezhesse a közép-angliai vadgazdaság igazgatásáról szóló részleteket, és e bíráló véleménye szerint ez a könyv semmiképpen sem helyettesítheti J. R. Miller *Gyakorlati vadgazdálkodás* című művét."

Szeretnék köszönetet mondani azoknak, akik akár szándékosan, akár tudtukon kívül hozzájárultak e könyv tartalmához vagy megírásához. Különösen hálás vagyok volt társszerzőimnek, Joseph Silknek és Frank Tiplernek, és köszönet illeti az alábbi személyeket is: Suketu Bhavsar, Margaret Boden, Paul Davies, David Deutsch, George Ellis, John Maynard Smith, Sir William McCrea, Leon Mestel, Don Page, Arthur Peacocke, Martin Rees, Dennis Sciama, Robert C. Smith, Roger Taylor, Stephen Toulmin, John A. Wheeler, Sir Denys Wilkinson és Stephen Wolfram. Köszönöm az Oxford University Press munkatársainak, hogy sok-sok papírlapomat olyan hatékonyan, a részletek iránti odaadó figyelemmel, meglepően rövid idő alatt könyvvé alakították. Hálás vagyok még feleségemnek a közvetlen környezet megteremtéséért, amelyben ezt a munkát végezhettem és elvégezhettem. Végezetül, családom egyes ifjú tagjai könyvem megírását régóta egy teljes mértékben képtelen méretezésű játékvasút felépítése legfőbb akadályának tekintették. A hagyományoknak megfelelően megköszönöm nekik a kéziratra tett számtalan bíráló megjegyzésüket, amelyek közül – attól tartok – egy sem volt beépíthető a végső változatba.

Brighton, 1987 októbere

J. D. B.

1

Prológus

Ó Természet és ó emberi lélek! Mennyire kimondhatatlanok kapcsolt analógiáid! Nem mozdul vagy él az anyagban oly atom, melynek ne volna ravasz mása az elmében.

Thomas Melville

Bevezetés

Olyasmit keresel, Joe,
Ami nem létezik.
Kezdetekre gondolok
Kezdetekre és végekre
Kezdetek és végek – ilyen dolgok
nincsenek,
Csak a közép létezik.

Robert Frost

A világról szerzett, állandóan változó tapasztalatunk mögött a rend és bizonyosság változatlan világa terül el, amely tetteink és vágyaink iránt pártatlan; olyan világ, amelynek része vagyunk, de amelyre nem tudunk észrevehető hatást gyakorolni; olyan világ, amelyet egy cseppet sem érdekel, hogy obskúrus tevékenységét meg tudjuk-e fejteni, de amely nélkül mégsem volna sem kozmosz, sem élet.

A természet évezredek alatt először lassanként megalkotta elménket, majd azon belül saját működésének egyfajta utánzatát, amelyet mi természeti törvénynek nevezünk. A természet emez utánzatát az anyag mikroszkopikus, belső világától kezdve a világegyetem legtávolabbi körzeteiig érvényesnek találtuk. Lépésről lépésre, megfigyelések, próbák és hibák útján építettük fel a minket körülvevő mindennapi világtól kezdve a belső és külső tér határaiig.

Amikor a fizikai világról szerzett észleleteinket értelmezni próbáljuk, tulajdonképpen egy kozmikus számítógép kimeneti adatait kell megfejtenünk. Mintázatait és billentyűzetével való kontárkodásunkra adott válaszait elemezve

megpróbáljuk felépíteni programozásának belső logikáját. Mindig is gyanították, hogy e programcsomag tiszteletet parancsoló ésszerűsége értelmes szerző jelenlétét tanúsítja. De kinek tulajdonítható e látszólagos ésszerűség? Az isteni programozónak, netán az embernek, az evilági számítógép-kezelőnek, aki saját elméjének tükröződését látja, amikor a kimeneti adatok megszervezésével birkózik?

Mit kezdjünk ezzel a képpel? Léteznek-e valóban természeti törvények „ott kint", a mi gondolkodásmódunktól függetlenül, arra várva, hogy fölfedezzük őket, vagy ez csak a látottak leírásának legmegfelelőbb módja? Hogyan keletkezett a „természeti törvény" fogalma? A végső valóságot képviselik-e ezek a törvények, vagy csak a mi törvényhozásunk darabjai, amelyeket magunk írunk elő, hogy a világról szerzett tudásunk rendszerezésében segítségünkre legyenek; jelzőkarók-e csupán, amelyekkel a tapasztalatok dzsungelén áttörve utunkat jelezzük? Lehetséges, hogy természeti törvények egyáltalán nem is léteznek? Lehet, hogy ezek és a világegyetem, melyet kormányozni látszanak, teljes egészükben elménk szüleményei: illúzió, mely eltűnik, mihelyt nem gondolunk rá. És mi történne, ha a világegyetemet senki sem figyelné meg?

Reméljük, miként Einstein, hogy a világegyetem ravasz, de nem rosszindulatú; ám abból, amennyit tudunk róla, akár ravaszul rosszindulatú is lehet. Nekünk talán egy végtelen világegyetem kicsiny szeletéről van szűklátókörű tapasztalatunk. Lehet, hogy a közelünkben érvényes körülmények a világegyetem más pontjaira nem jellemzőek. Ha jobban meggondoljuk, lehet, hogy a „megfigyelők" kifejlődéséhez különleges feltételekre volt szükség. A környezetünkben érvényes törvények vajon ugyanazok-e, mint másutt a világegyetemben? Időben változatlanok-e, vagy fokozatosan változnak, amint a világegyetem tágul és öregszik?

Az ilyenfajta kérdések korábban főleg a spekulatív bölcselet művelőinek fennhatósága alá tartoztak, akiknek elbátortalanító feladata: általános következtetések levonása mindazon finom részletek alapos ismerete nélkül, amelyekre a következtetések vonatkoznak. A pozitivista lehetőség még lesújtóbbnak látszott: megelégedni azzal, ami nyilvánvaló és feleslegesen ismétlődő, vagyis a tudás üledékével, amit aligha érdemes tudni. Az utóbbi években azonban a fizikusokat és kozmológusokat elméleteik olyan vidékekre vezették, ahol az afféle metafizikai találós kérdések, mint például „Lehet-e semmiből világegyetemet teremteni?", a tudományos vita homlokterébe kerültek, sőt lehetséges, hogy megfigyelés útján vizsgálhatónak bizonyulnak. Komoly vadászat folyik egy „minden létező elméletére". A jelöltek – most először – a fizika főáramából kerülnek ki, nem csak egy Eddington vagy Einstein hóbortos kutatásaiból. Valószínű, hogy az elméleti fizikai kutatásokból az elkövetkező tíz évben

születő eredmények olyan széles körű interdiszciplináris érdeklődést váltanak ki a fizika iránt, amilyen egykor a korai kvantumelmélet iránt nyilvánult meg. Mindazonáltal érdekes, hogy a fizikai alapkutatásnak a hagyományosan filozófusok és teológusok érdeklődésére számot tartó kérdések felé való eltolódásával párhuzamosan a fizikusok között egyre csökkent az érdeklődés a fejlemények által felvetett filozófiai kérdések iránt. A legtöbb tudós számára a „filozófiai kérdés" arra alkalmas címkévé vált, amelyet bármilyen homályos, megválaszolhatatlannak látszó kérdéscsoportra rá lehet akasztani. Később azonban, ha tudományos kérdéssé lépnek elő, komoly megfontolást érdemelnek majd. Ez talán azért van így, mert a tudósok úgy látják: a filozófiai kutatás haladása egyenlő annak művészi kimutatásával, hogy a filozófia múltbeli „problémái" közül egyre több csak látszólagos szemantikai zavar. Reméljük, hogy a természet működésében felfedezett néhány szokatlan jelenség újra felélénkíti majd a tudományos problémák messzebb ható következményeinek vizsgálatát.

Előrelátásra és ellenőrzésre ösztönzés

> A legközvetlenebb és bizonyos értelemben a legfontosabb kérdés, amelynek megoldására a természet tudatos ismeretének képessé kell tennie bennünket, a jövő eseményeinek előrelátása.
>
> Heinrich Hertz

A legújabb kori társadalmakban a transzcendencia népszerű keresésében testet öltő furcsa kultuszok és kultúraellenes filozófiák egyik közös eszménye: megjósolni a jövőt, akár a csillagokban vagy tealevelekben, akár misztikus látomásban vagy az ember tenyerében van elrejtve. Minden nagy példányszámú napilap horoszkóppal kedveskedik olvasóinak. Azok, akik vonzódnak e gondolkodásmódhoz, gyakran különös módon megnyugtatónak találják, ha arról olvasnak, hogy „a tudósok zavarban vannak", és egyre bizonyosabbá válik az a reményük, hogy az intézményesült tudomány mégsem képes mindenre választ adni.

Paradox módon azonban a tudomány olyan mértékű haladást ért el, és annyira sikeres, hogy – nagyrészt észrevétlenül – uralja a legtöbb ember mindennapi életmódját, éppen azért, mert az egyetlen ismert megközelítése a természetnek, amelynek segítségével a jövő ellentmondásoktól mentesen előre látható. Elődeink által nem is álmodott mértékben felfedeztük a világegyetem legfontosabb kulcsát: az eseményeket számokba kódolva meg tudjuk jósolni a

jövőt. Meg tudjuk jósolni, mikor tér vissza a Halley-üstökös, hogyan szállnak a repülőgépek, mikor érkezik űrhajó a Holdra, mikor fog a Nap kihunyni, mikor lesz apály és dagály, és milyen újfajta elemi részecskét fognak találni a CERN gyorsítóinak detektorai Genfben. Az a tény, hogy ehhez hasonló pontos előrejelzéseket ilyen gyakran, ilyen sokféle körülmények között és ennyire megbízhatóan tehetünk, hogy ezer különféle módon ezekre épül életünk, valami nagyon lényegeset mond a világegyetem működéséről. A természettel kapcsolatos tapasztalatunkban jelentkező ilyetén szabályosságokat neveztük el „természeti törvényeknek". Számos különböző formájuk, oldaluk és szerepük van. Egyesek a világegyetemről alkotott képünk mélyre ásott alapkövei, míg másokat hézagpótlónak tekintünk, és addig használjuk őket, amíg meg nem találjuk az igazit vagy legalább egy javított változatot. E könyv fejezeteiben bemutatjuk a természeti törvények néhány érdekes oldalát. Megpróbáljuk majd kihangsúlyozni olyan új fogalmak és felfedezések hatását a fizikában, amelyek a természeti törvények jellegét illető hagyományos tanok megfogalmazásakor még ismeretlenek voltak.

A jövő előrelátásának képessége hatalmas fegyver, és sok ezer évvel ezelőtt az ókori civilizációkban felismerték, hogy a csillagjóslás lehetőséget ad a hatalmon lévő elitnek az uralkodásra. A kiválasztott kevesek, akik azt állították: képesek megjósolni és értelmezni a csillagok állását, megszabhatták egyének és egész nemzetek jövőjét. Legújabban az előrejelzés képességét kevésbé baljós módon láttuk felhasználni gazdasági érdekből, a mezőgazdaságnak kedvező időjárási körülmények megjósolásával vagy küszöbön álló természeti katasztrófákra való figyelmeztetéssel. Az előrejelzés képességének hangsúlyozása természetszerűleg érdeklődést szül aziránt, vajon helyesek-e a jóslatok. A császári Kína csillagjósai számára a helytelen jóslat a halált jelentette. Manapság a csillagjóslás nem ilyen veszélyes foglalkozás, bár rossz tudományos jóslatok lesújtó és megrázó következményei, számos emberéletet követelve, az utóbbi években tönkretették az amerikai űrprogramot és a szovjet nukleárisenergia-programot.

Minden tudományos elméletnek próbaköve, hogy előrejelzései hogyan állják ki a kísérletek próbáját. A tudósok az előrejelezhetőséget minden hasznos tudományos törvény alapvető fontosságú alkatelemének tekintik, mert módot ad annak kiderítésére, hamis-e a törvény, s ha igen, kijavítását is lehetővé teszi. Így a gondolatoknak egy általunk alkalmazott szelekció hatására történő fejlődését idézhetjük elő. A szelekció egyszerű: összhangot teremteni azzal, ami létezik. Ha egy előrejelzés helyes, az elmélet számára új, küzdelmes nap virrad fel. A siker azonban nem jelenti azt, hogy az elmélet helyes, mert egy bizonyos beállításban való helyessége nem kezeskedik azért, hogy más

körülmények között is helyes, ámbár minél több tényt magyaráz meg egy és ugyanazon elmélet, annál nagyobb a valószínűsége annak, hogy a következőkben is sikeres és számunkra egyre hasznosabb lesz. Stephen Toulmin egy feljövőben lévő teniszjátékoshoz hasonlította a megfigyeléssel szembekerülő tudományos törvény fejlődését: mindig új ellenfeleket keres. Leginkább azonban olyan ellenfelet akar találni, aki csak kevéssel jobb nála. Kizárólag így fejlesztheti tudását. „Hasonlóképpen a tudós is olyan eseményeket keres, amelyek még nem teljesen érthetőek, de amelyeken valószínűleg úrrá lehet valamilyen hatalmában álló intellektuális lépéssel." Megoldásra még nem érett problémákkal kísérletezni – amelyek vagy túl nehezek, vagy megfigyeléssel nemigen lehet ellenőrizni őket – olyan, mint a wimbledoni bajnokot kihívni: izgalmas (talán még egy sikerkönyv témája is lehet), de végső soron nem épületes.

Mások, nevezetesen Karl R. Popper, fontosabbnak tartják azt, amikor a kipróbálás alatt álló természeti törvény nem tud helyes előrejelzést adni. Ebben az esetben ugyanis egyértelmű eredményt kapunk: a törvény jelenlegi megfogalmazása helytelen. A legtöbb tudóst nem tenné boldoggá az a gondolat, hogy minden természeti törvénynek vagy elméletnek cáfolhatónak kell lennie, abban azonban mindannyian egyetértenének, hogy a cáfolhatóság elégséges feltétele annak, hogy egy állítást „tudományosnak" vagy értelmesnek minősíthessünk. Itt óvatosnak kell lennünk. Ha egy elmélet által adott előrejelzést vizsgálunk, soha nem vizsgálhatjuk elszigetelten, csak az egyik oldalát. Mindig feltételezések összefonódó hálózata az, aminek a helyességét vizsgáljuk. Ha a várt eredményt nem kapjuk meg, ki kell választanunk, hogy nagyszámú, összefonódott feltételezésünk közül melyik volt helytelen. Lehet, hogy a cáfolási próba kivitelezéséhez használt műszerekkel kapcsolatos, hibás elmélet a bűnös, nem pedig az állítólag vizsgált hipotézis. A gyakorlatban a jó kísérleti tervezés annak művészete, hogyan lehet elkülöníteni a vizsgálandó szempontot azáltal, hogy az összes többi alkotóelemet már kedvező eredménnyel vizsgáltuk más kísérletsorozatokban. Látjuk, hogyan biztosítja a természeti törvények előrejelzéseinek vizsgálatára való összpontosítás azt, hogy a tudomány valóban megfigyeléseken, ne pedig „tényeken" alapuljon, és így állandó fejlődésben legyen. Míg azonban kísérleteink próbára tudnak tenni elméleteket, és meg tudják különböztetni a sikerest a sikertelentől, nem képesek elméleteket felállítani. Valójában az elméletek szokták sugallni a kísérleteket.

A természeti események megjósolásában elért sikereink közelebbi vizsgálata azonban rámutat valamire, ami első látásra némileg ellentmondásosnak tűnik.

Az előrejelezhetőség paradoxonja

Ha adva van egy írott nyelv, hány szóból kell állnia egy ezen a nyelven nyomtatott könyvnek ahhoz, hogy tartalmazza a könyv előállításához szükséges összes információt?

N. Rashevsky

A sikeres előrejelzésre való képességünk azt látszik szemléltetni, hogy a természetnek van egy befolyásunkon túli területe: egy olyan része, amely kívül esik az emberi hatásokon. Ahhoz, hogy meglássuk, mit jelent ez az állítás, vizsgáljuk meg először, miképpen lehetséges, hogy bizonyos körülmények között a jövő eseményeinek előrejelzése logikai képtelenség, bármennyire is jövőbelátók vagyunk egyébként.

Akármennyi pszichológiát és fiziológiát tanulnék is, sohasem tudnám az ön jövőbeli viselkedését úgy megjósolni, hogy azt igaznak kellene tartania, hiszen mindig megcáfolhatná jóslatomat, miután azt felfedték ön előtt. Az emberi viselkedésre vonatkozó ismereteim csak akkor korlátozhatják önt, ha így akarja. Előrejelzésem mindazonáltal teljesen pontos maradhatna, ha *nem* mutatnák meg önnek.

Ideillő példa a tömegkommunikációs eszközök teremtménye: a közvélemény-kutatás. Az a választás előtti közvélemény-kutatás, amelyet nyilvánosságra hoznak, sohasem jósolhatja meg tévedhetetlenül a választás eredményét, mert logikai képtelenség, hogy figyelembe vehesse saját hatását a későbbi szavazásra. Összeesküvést szőhetnénk, hogy szemléltessük: egy adott közvélemény-kutatás nem képes helyes előrejelzést tenni, mégpedig úgy, hogy mindannyian Lord Akárkire szavaznánk, miután olvastuk a közvélemény-kutatás eredményét, mely szerint Lord Akárki egyáltalán nem kap majd szavazatokat. Általánosítva: *elvileg* lehetetlen figyelembe venni egy előrejelzés hatását a szavazók döntésére, amelyre az előrejelzés vonatkozik. Vegyük észre: ez nem jelenti azt, hogy minden ilyen előrejelzés szükségszerűen rossz. Viselkedésemről ma adott előrejelzése tökéletesen helyesnek bizonyulhat. Ha nem akarom, nem kell megcáfolnom, de soha sem lehet biztos benne, hogy nem teszem meg. Jövendő viselkedésemnek tökéletesen helytálló előrejelzése lehetne, és maradhatna mindörökre, ha nem mutatná meg nekem. A lényeges itt az, hogy ezekben a helyzetekben az előrejelzés sikere nem szavatolható. Bármikor dönthetek úgy, hogy megcáfolom a viselkedésemről adott előrejelzést pusztán azáltal, hogy nem hiszem el. Látható, hogy az efféle meggondolások óvatosságra intenek bennünket, amikor azt a kérdést fontoljuk meg, vajon van-e szabad akarat. A kérdés nem egyszerűen így hangzik: Szabad akarat vagy

determinizmus? – hanem így: Kire vonatkozó szabad akarat vagy determinizmus? Mulatságos megemlíteni ezt a szükségszerű következtetést: a sikeres horoszkóp elvileg lehetetlen. Kivéve persze két esetet: vagy nem olvassuk el, vagy pedig úgy döntünk, hogy saját akaratunkból a megjósolt dolgokat tesszük!

Ha saját döntéseinket valamilyen tudományos képlet segítségével képesek volnánk megjósolni, ez feltételezné, hogy már meghoztuk e döntéseket. Ez a logikai dilemma.

Az említett példák azt mutatják, hogy a választási előrejelzés nem olyan, mint az időjárás előrejelzése. A választási előrejelzésnek szükségképpen megjósolhatatlan hatása van a választás kimenetelére, az időjárás előrejelzése ezzel szemben nem tudja befolyásolni az időjárást, amelyet rajtunk *kívül álló* tényezők határoznak meg. Ez a különbség felelős a fizikai tudományok lenyűgöző sikereiért a múltban, és a közgazdasági és társadalomtudományok hasonlóan lenyűgöző kudarcaiért, amikor ugyanezeket a vizsgálati módszereket alkalmazták. Képzeljük csak el, milyen reménytelen volna a vegyész élete, ha a molekulák úgy viselkednének, mint a közgazdász vizsgálatának tárgyai!

Descartes és követői, a karteziánusok a világ természetéről tehető egyik legalapvetőbb megállapításnak tartották a legtöbb fizikai tudomány területén végezhető tanulmányoknak e megnyerő vonását, azt tudniillik, hogy a vizsgált dolgok természete nem változik meg attól, hogy vizsgálják őket. Ez a természet megfigyelőjét a tanulmányozott külvilágtól elválasztó „dualizmus" nemcsak arra szolgált kiváló eszközként, hogy a vallási és etikai kérdéseket kizárják a tudományos vizsgálódás köréből, hanem arra is, hogy az alkimisták mágikus bohóckodását is kirekesszék onnan. Az alkímia a kedvező eredmények eléréséhez megkövetelte, hogy a kísérletező megfelelő lelkiállapotban legyen. A laboratóriumnak kápolnának kellett lennie. A megfigyelőt és a megfigyelés tárgyát tehát megbonthatatlan kapcsolat fűzte össze. A kísérleteket nem lehetett megismételni. Mindez kissé emlékeztet az Uri Geller-féle jelenségekre, melyeket, mint mondják, csak rokonszenvező közönség előtt lehet bemutatni!

A dualista szemlélet a tudományban a XX. századig igen sikeres volt, s éppen ez az örökség lehet felelős néhány fizikus sajnálatos tapasztalataiért, akik paranormális jelenségek vizsgálatával próbálkoztak. Ha az ilyen jelenségek esetében szándékos csalással szembesülnek, akkor a fizikai tudományok művelői különösképpen alkalmatlanok arra, hogy ezt észrevegyék, mert sajátos észjárásuk szerint biztosra veszik, hogy a vizsgált jelenségek nem játszanak össze ellenük. A varázsló (vagy akár a hamiskártyás) inkább alkalmas az ilyen paranormális jelenségek vizsgálatára, mint a tudós, aki gyermeki hittel bízik a természet szabályosságában.

A külső világ: első megközelítés

> Ha világunk fizikai törvényei autonómak, nem vagyunk szabadok; ha viszont szabadok vagyunk, a fizikai törvények nem autonómak.
>
> Karl R. Popper

A természeti jelenségek – akár hulló almákról, akár napfogyatkozásokról van szó – sikeres előrejelzésének képessége kijelöli számunkra azt, amit megközelítőleg *külső világnak* nevezhetünk: azon dolgok és események összességét, amelyet akaratunkkal nem befolyásolhatunk. Ez a kijelentés korántsem annyira antropocentrikus, amilyennek első pillantásra látszik, mert ugyanígy vonatkozik a mesterséges intelligencia különböző formáira is, például a számítógépekre.

Mégis, míg az emberi cselekvés meghatározására kötelező erejű törvény és az emberi viselkedésre helyes előrejelzés nem létezhet, létezhet és létezik is helyes előrejelzés az atomok viselkedésére, a gravitációra, az elektromos áramra, a szilíciumlapkákra stb. Ezek az események előrejelezhetők, mert saját döntéseinkkel nem irányíthatók. A gravitáció belső erejét vagy az elektromosság tulajdonságait éppúgy nem tudjuk befolyásolni, mint ahogy nem tudjuk előrejelzésünkkel megváltoztatni az időjárást. E külső dolgokat olyan tényezők látszanak igazgatni, melyeket akaratlagosan semmilyen módon nem tudunk befolyásolni. Az utóbbi érvvel elérkezünk paradox következtetésünkhöz, mely szerint bizonyos események éppen azért jelezhetők előre, mert *mi magunk* nem tudjuk irányítani őket, mégpedig azért nem, mert valami más már nyilván irányítja őket: az, aminek az idők során a „természeti törvény" nevet adtuk.

Azt is meg kell mondanunk, hogy bár az előrejelezhetőség arra utal, hogy valami irányításunkon kívül esik, az előrejelzésre való képtelenség nem jelenti szükségképpen azt, hogy az eseményeket mi irányítjuk. A gyakorlatban sokféle oka lehet annak, hogy előrejelzésünk kudarcot vall; ezek közül néhányat a későbbi fejezetekben közelebbről is megvizsgálunk.

Az imént bemutatott érvelés az élet „józan ésszel belátható" tényeire vonatkozó megállapítás, amelyet a karteziánusok ösztönösen felismertek. Kitűnő vezérelv volt abban az időszakban, amikor a tudomány a világ működéséről alkotott mechanisztikus képek segítségével nagy léptekkel haladt előre. A 3. fejezetben sajnos majd meglátjuk, hogy amikor a természetet végletesen próbára tesszük, a megfigyelő és a megfigyelés tárgya közti gát igen sajátos módon eltűnik, ami figyelemreméltó következményekkel jár. Előfordul, hogy felismerjük: a megismerés kiismerhetetlen módon megváltoztatja a dolgokat.

Azokra a törvényekre, amelyek meggátolják, hogy irányítsuk az eseményeket, de előrejelzésüket lehetővé teszik, a legkirívóbb példát a statisztikai törvények szolgáltatják. A példa kirívó, mert látszólag nincs egyszerű szabály, amely egy ismétlődő esemény minden egyes kimenetelére hat, hogy biztosítsa: a hosszú távú eredmények előrejelezhetően átlagosak legyenek. Ha például többször feldobunk egy hibátlan érmét, akkor, bár nem tudjuk biztonsággal megjósolni, hogy az egyes dobások fejet vagy írást eredményeznek-e, annyit megmondhatunk, hogy amint a dobások száma nő, a fejet adó dobások száma egyre jobban megközelíti az írást adókét. Érdekes lesz majd megkérdezni, mi az, amit ebben az esetben nem tudunk irányítani, és aminek a megbízható előrejelzés köszönhető. Az ilyen típusú statisztikai törvények fontos szerepet játszanak mindennapi életünkben. Ezeket használják a biztosítótársaságok annak valószínűségét felmérendő, hogy különféle szerencsétlenségek érhetnek bennünket, és ennek megfelelően állapítják meg, mekkora díjat fizessünk évente. A fogadóirodák is egész jól megélnek belőlük. A statisztikát valójában a szerencsejátékosok teremtették meg!

Érdekes felidézni a külső világ és saját elménk Poppertől származó népszerű elhatárolását, amely a dualizmus egyik legújabb változata. Popper szerint három „világ" létezik. Az I. világ tartalmazza a valóságos fizikai tárgyakat, mind a szervetleneket, mind a szerveseket: sziklákat, tengerimalacot, önt és engem. Beletartozik agyunk és az emberi alkotókészség minden terméke: könyvek, festmények, szobrok. A II. világ a tudat állapotait tartalmazza: az eszmékről, emlékekről, álmokról, gondolatokról és észleletekről nyert szubjektív tapasztalatunkat. Végül a III. világ tartalmazza az objektív tudást: tudományos tényekről, feltevésekről, filozófiáról, történelemről készült írásos feljegyzéseinket, valamint a számítógépek memóriájának tartalmát, a tudományos vitákkal és matematikai tételekkel egyetemben. Az I. világ lakóit nem lehet objektív módon ábrázolni anélkül, hogy át ne tévednénk a II. vagy a III. világba. Tudományos vizsgálataink a II. világba tartozó szubjektív élmények, melyeknek az I. világ tényleges létezői a tárgyai, ami a világegyetemre vonatkozó előrejelzések, kritikai kérdések és elméletek megfogalmazásához vezet, ez utóbbiak pedig a III. világba tartoznak. A III. világ tárgyai csak elménk közreműködésével hozhatók létre. A világegyetemről alkotott tudományos elméleteink eredménye a természeti törvényeknek általában matematikai egyenletek formájában való megfogalmazása, s ezek az egyenletek a III. világban honosak. Szeretnénk tudni, vajon valóban léteznek-e természeti törvények az I. világban, vagy csupán a II. világban keletkeznek.

A következő fejezetben megkíséreljük nyomon követni amaz eszme történeti fejlődését, mely szerint léteznek természeti törvények, hogy meglássuk,

vajon ez a fogalom bizonyos általános emberi, avagy sajátszerű kulturális előítéletekben gyökerezik-e, amelyek a II. világ lakói. Azt is megvizsgáljuk, miképpen játszott ez a fogalom jelentős szerepet vallási és filozófiai nézőpontjaink fejlődésében.

Leírás vagy előírás?

> Semmi sem bizonyítja, hogy Erzsébetnek különösebben ínyére lett volna a festészet; ám fölöttébb kedvelte az őt ábrázoló képeket.
>
> Horace Walpole

Előszavunkban eddig meglehetősen határozatlan értelemben használtuk a természeti törvény fogalmát. A természeti törvény szemléletének azonban számos, egészen különböző módja van, és e különbségeknek fontos tudatában lenni, hiszen különböző szerzők a „természeti törvény" vagy „a természet törvénye" kifejezéseket fölöttébb különböző értelemben használják. Gyakran már kétféle választási lehetőség is zűrzavarhoz vezet.

Némelyek számára a „természeti törvény" azt írja le, ami ténylegesen történik. Nem más ez, mint szabályosságokról készült történeti feljegyzések összessége. Természetesen ezeket a törvényeket definíció szerint nem lehet megszegni. Olyan ez, mintha feljegyzést készítenénk a házunk előtt elhaladó forgalomról, és ezt a forgalom „törvényének" neveznénk. Ha a természeti törvényeket ilyen, tisztán leíró módon szemléljük, akkor például értelmetlen volna azt állítani, hogy a csodák lehetetlenek, mert megsértik a természeti törvényeket, hiszen az így felfogott törvények semmit sem rendelnek el, ezért megszegni sem lehet őket. Mások viszont a megtisztelő „természeti törvény" kifejezést ennél különlegesebb célra tartogatják: a természetről alkotott modellünkre. Ha természeti törvényen különféle deduktív összefüggésekre, matematikai képletekre, szimmetriaelvekre, megmaradási szabályokra, avagy olyan szabályokra utalunk, melyek kimondják: „ha a helyzet ez és ez..., akkor abból ez következik" – akkor ezeket a mesterséges következtetéseket vagy nagystílű általánosításokat, melyek arra vonatkoznak, hogyan is kellene a természetnek működnie, meg lehet szegni. Egy efféle törvényszegés azt jelezné, hogy előzőleg helytelen szabályt alkottunk az események törvénybe foglalására, talán hibás logika folytán, helytelen kísérleti adatok miatt vagy még valószínűbben azért, mert olyan jelenséggel találkoztunk, amilyen még nem fordult elő.

Őrizkednünk kell attól is, hogy a valóságot olyan skatulyákba próbáljuk belegyömöszölni, amilyenekbe nem való. Ismertetés céljából célszerű lehet el-

különíteni a törvények két lehetséges, leíró és magyarázó formáját, de azonos állítások – a szövegösszefüggéstől függően – néha bármelyik szerepet játszhatják: „Könyvet írok" – ez lehet leírás, ha a „Mit csinálsz?" kérdésre felel, ám magyarázat, ha a „Miért nem mosogatsz el?" kérdésre adott válasz.

Ez a kétértelműség a tudománynak a kísérletben összegeződő leíró szerepe és az elmélet magyarázó szerepe között valószínűleg egészséges dolog. Azt az egyensúlyt szemlélteti, amely tudományos életünkben az elmélet és a kísérlet között áll fenn. Ha akár a magyarázat, akár a leírás nyilvánvalóan túlsúlyban lenne, ez azt jelezné, hogy az egyik szempont a másikhoz képest túlburjánzott. Egyes szakterületeken, mint például a kozmológiában és az elemi részecskék fizikájában a döntő kísérletek hatalmas léptéke és a magas beruházási költségek miatt az elmélet valóban megelőzi a gyakorlatot. Más területeken, nevezetesen az állattanban és a biokémiában a megfigyelési és kísérleti adatok óriási mennyiségben gyűltek össze. Nagyon nehéz széles körben érvényes törvényeket megfogalmazni, mert a legcsekélyebb általánosításhoz is tömérdek ténnyel kell összhangban maradni. Ezért a fizikai tudományok az előíró típusú törvények felé hajlanak, míg az élettudományok leíró törvényeket alkalmaznak. Ezt a problémát néha úgy kell ellensúlyoznunk, hogy kiválasztjuk a szerintünk magyarázatot igénylő, elsődleges tényezőket, a többit pedig elhanyagoljuk abban a reményben, hogy az elsődleges tényezőket sikeresen megmagyarázó kép aztán folyamatosan tovább finomítható, s így idővel a kisebb ellentmondások is kiküszöbölhetők. Érdemes hallgatni Ernst Machra, aki a túlzott becsvágy veszélyére figyelmeztet: „Ha minden egyes tény – minden egyes jelenség, amelyet ismerni vágyunk – azonnal rendelkezésünkre állna, sohasem jött volna létre egyetlen tudomány sem."

Még akkor is, ha óriási tömegű tényt ismerünk, ügyességre, ítélőképességre, tapasztalatra és megérzésre van szükség ahhoz, hogy kiválogassuk közülük a kiemelkedő fontosságúakat. Tapasztalatunk azt mutatja, hogy a fizikai világegyetemnek csak egy kicsiny részhalmazát kell tanulmányozni ahhoz, hogy a mögötte rejlő összefüggésekre és viselkedési mintázatokra fény derüljön. Alapvetően ezt jelenti a természeti törvények létezése, ezért olyan felbecsülhetetlen értékűek számunkra. Lehetővé tehetik, hogy a teljes világegyetem megértését annak válogatott, kis részeinek tanulmányozásából építsük fel.

A különböző tudományszemléletek

Ha a tudományos módszertan célkitűzése abban merül ki, hogy előírjon vagy magyarázzon egy kutatási rendszert, sőt mi több, gyakorlati szabálygyűjteményét adja a tudományos viselkedésnek, akkor – úgy tetszik – a tudósok ragyogóan elboldogulnak nélküle.

Peter Medawar

A tudományfilozófusok régóta és behatóan vitatják a „természeti törvény" fogalmának jelentését. E vitáknak nem volt észrevehető hatása a tudomány gyakorlatára, mert a legtöbb tudós hajlik arra az előítéletre, hogy „a tudományfilozófia körülbelül annyi hasznot hajt a tudománynak, mint a madártan a madaraknak" (mindamellett meg kell jegyezni, hogy néhány madárfaj az ornitológusok érdeklődésének köszönheti fennmaradását). Mielőtt belemerülnénk e disputák tárgyalásába, először egy definíciós kérdést kell tisztáznunk. A természeti törvényeket illető, előbb említett terminológiai különbség a tudomány más vetületeiben is tükröződik. A fizikus a „kvark" szót használva néha magát a kvarkot érti rajta, máskor viszont a róla alkotott elméleti modellt. Az ehhez hasonló jelentésbeli finomságok számos, egymástól teljesen különböző szemlélethez vezettek a természeti törvényeket illetően. Ezen értelmezések közül egyik sem cáfolható meg, így tehát bármelyiket fogadja is el a kísérleti fizikus, ez semmilyen irányban nem befolyásolhatja eredményeit, bár igenis befolyásolja azt, milyen kutatásokba kezd az elméleti szakember, milyen témákat tart tanulmányozásra érdemesnek, és milyen kérdéseket tekint tudományosan tanulmányozhatónak. A munkájukról beszámoló népszerű előadásokon sokkal színesebbé teszik a laikusoknak festett képet, és a belőle levonható nem tudományos következtetéseket. Annak ellenére, hogy a tudományra és a természeti törvényekre vonatkozó különféle felfogások egyikét sem lehet határozottan megcáfolni, látni fogjuk, hogy igenis léteznek egyes felfogások ellen, illetve mások mellett szóló, meggyőző közvetett bizonyítékok. E szempontokat hasznos észben tartanunk, amikor a későbbi fejezetekben néhány új tudományos fejleményt vizsgálunk majd meg, mert e tudományos szemléletek olyan korban keletkeztek, amikor a tudomány még kisebb és egyszerűbb tárgy volt. Érdekes lesz látni, hogy belegyömöszölhető-e még ez a tárgy e nézőpontok keretei közé.

Empirizmus. Az empirista azt tartja, hogy a világról szerzett tudásunk mindössze egyedi tények gyűjteménye, amelyre a megfigyelő nem gyakorol szubjektív hatást. Minden értelmes fogalom visszavezethető érzékszervi tapasztala-

tokra, és a tudományos elmélet csupáncsak megfigyeléseink alkalmatos összefoglalása. A megfigyelőnek, amikor kutatóként tevékenykedik, nincs személyes hozzájárulása.

Ez a megközelítés közeli rokonságban van a *pozitivizmus*nak nevezett, háború előtti filozófiai mozgalommal, melynek képviselői úgy érvelnek, hogy a világ tanulmányozása során mindig csak egyedi esetekkel kerülünk szembe, sohasem általánosakkal. Az általánosakat úgy alkotjuk meg, hogy közös nevet adunk sok egyedi esetnek, amelyek bizonyos közös vonásokkal rendelkeznek; e közös vonások azonban az egyesekből alkotott gyűjteményünkön kívül nem léteznek. Az empirista szerint a törvények csak e közös vonásokon alapuló csoportok sajátságai, megfelelő leírás, amely nem kezeskedik érte, hogy a jövőben bármi is történni fog. A „bűnös" nem valamilyen univerzális lény, hanem bűnös hajlamaik alapján összeverődött egyének csoportja. A világnak ezt a megközelítését néha „nominalistának" is nevezik, azt hangsúlyozandó, hogy a természeti törvényeket pusztán leíró tulajdonságúnak tartja: csupán bizonyos eseménysorokat jelölő neveknek.

Az empirizmus azt is magában foglalja, hogy igazából sohasem „tudhatunk" semmit azokról a dolgokról, amelyeket nem lehet megfigyelni. Bármilyen tudás, amelyről azt állítjuk: tisztán gondolkodás útján szereztük a világról, mindössze szóhasználatunk módját tükrözi, semmit nem mond a valóságos világról. A témának egy másik oldalága az az érvelés, mely szerint egy állítás igazságáról csak akkor van értelme vitatkozni, ha ismert a jelentése. Ez egy olyan filozófiai iskola létrejöttéhez vezetett, amely a *bizonyítás* fontosságát hangsúlyozta. Valamely állítás jelentését ténylegesen bizonyításának módszereként határozták meg. A bizonyítási folyamatnak pedig két kivitelezési módját ismerték el: a gyakorlati megfigyelést és a szavak közti logikai kapcsolatot.

Operacionalizmus. A pozitivizmus másik válfaja. Az operacionalista érvelése szerint a tudomány nem több, mint előírások összessége a világnak a laboratóriumban való hatékony kutatásához. Csak azok a fogalmak értelmesek, amelyeket „operációnak" (műveletnek) nevezett, a gyakorlatban kivitelezhető lépések sorozatával meg lehet határozni. Egyéb fogalmak, mint például az intelligencia, értelmetlenek. E doktrína szerint a tudományos törvények a világnak nem leírására, hanem irányítására szolgálnak, és az elméletek pusztán olyan gépezetek, amelyek előrejelzéseket állítanak elő a világról.

Az operacionalista valamivel nyomatékosabban hangsúlyozza az elmélet szerepét a megfigyeléshez képest, mint az empirista. Azok a jó elméletek, amelyek lehetővé teszik, hogy pontosabban és előnyösebben irányíthassuk a

világot. A leghasznosabbaknak van a legnagyobb túlélési értékük, de nem lehet „igazságot" vagy „hamisságot" tulajdonítani nekik. Az operacionalista külön hangsúlyozná azt is, hogy ezeket az elméleteket, miután sikeresen megfogalmaztuk őket, semmi másra nem használjuk, mint újabb, átfogóbb és jobb elméletek keresésére. Így az elméletek gyakorlatilag és elsősorban eszköznek tekinthetők.

Instrumentalizmus. Az operacionalizmus továbbfejlődve végül is az instrumentalizmusnak nevezett tudományfilozófiává alakult. Az empirista a filozófiai pozitivistára emlékeztet, az operacionalista pedig számos közös vonást mutat azzal a fajta nyelvfilozófiával, amivé a pozitivizmus alakult, ahol a hangsúly azon van, hogy jelentésük megfejtésének céljából meghatározzuk, miképpen is használják a szavakat. A tudományos állításban az a fontos, hogyan használják a szavakat, nem pedig az, mit jelentenek, vagy mit írnak le. Ezt a nézetet *instrumentalizmus*nak nevezik, annak hangsúlyozására, hogy a tudományos elméleteket és a természeti törvényeket csupán eszköznek kell tekinteni a minket körülvevő világ jobb megismeréséhez: nem szabad őket sem szó szerint venni, sem pedig önmagukban igazsággal felruházni. Nem az számít, hogy igazak-e vagy hamisak, hanem az, hogy *hasznosak*-e. Az elmélet – fény a sötétségben, útjelző a tapasztalat útvesztőjében.

Az empiristától eltérően az instrumentalista nem vallja, hogy csak azok az érvényes fogalmak, amelyek visszavezethetők érzékszervi tapasztalatokra. Az elmélet és az emberi elméletalkotó is szerephez jut. A tudós tevékenysége nem merül ki a megfigyelt adatok feljegyzésében és szétválogatásában, hanem beletartozik az adathalmaz megszervezéséhez szükséges modellek megalkotása és továbbfejlesztése is.

Idealizmus. Az idealista nézete szerint – mivel minden tudás, amit magunkénak vallunk, átszűrődik elménken – sohasem lehetünk bizonyosak afelől, hogy létezik-e közvetlen összefüggés a valóság és róla alkotott eszméink között. Mindez tulajdonképpen bonyolult álom: *idea*, gondolat. Ezért meg kell különböztetnünk a valóságos természetet és róla alkotott észleleteinket. Az elméleteinkben szereplő létezők a világegyetemben valójában nem léteznek, elménk rendeli őket az érzékszervi tapasztalatok zűrzavaros halmazata fölé. E megközelítés végletes formája a *szolipszizmus*, amelynek képviselői úgy tartják, hogy a megfigyelő személy által tapasztalt külső világ teljes egészében saját képzeletének terméke.

Realizmus. A realista hisz a külső világ létezésében, valamint abban, hogy a tudósok megfigyelései és az általuk felismert természeti törvények közvetlen kapcsolatban állnak a valósággal. A helyes elméletek leírta létezők a megfigyelőtől függetlenül is léteznek, következésképpen minden elmélet – akár ismert, akár nem – vagy igaz, vagy hamis. Míg az operacionalista és az empirista a megfigyelhetőséget hangsúlyozza, addig a realista az érthetőségre és a vizsgálhatóságra összpontosít.

A realista úgy gondolja, hogy léteznek természeti törvények „ott kint", függetlenül attól, hogy észleljük-e őket, és a tudást főképpen a megfigyelt dolog gyarapítja, nem a megfigyelő vagy a megfigyelés folyamata.

Érvek és ellenérvek

Nincs olyan lehetetlen dolog, amit egy filozófus ne tudna állítani.

Cicero
(Ford. Bánk József)

Bár leszögeztük már, hogy ezen egymással versengő dogmák egyikét sem lehet sem elvetni, sem logikusan bizonyítani (hogyan is lehetne, lényegében nem a bizonyítás természetéről szól-e valamennyi?), mégis minden bizonnyal meggyőző érveket lehet felhozni egyesek mellett és mások ellen.

Kezdjük az empiristákkal. A gyakorló tudós számára nem hangzik valami jól az az empirista nézet, hogy egy elmélet soha nem lehet több, mint adatok leírása. Elméletek csak nagy ritkán keletkeznek így. Az elemi részecskékkel foglalkozó fizikus, amikor annak titkát kutatja, milyen elemi részecskék léteznek, és milyen kölcsönhatásban állnak egymással, matematikai modelleket fogalmaz meg, amelyeket lenyűgöző szimmetriatulajdonságaik miatt választ ki. E tulajdonságok megkívánják, hogy bizonyos részecskék létezzenek és egymással különleges kölcsönhatásokba lépjenek, s hogy a szimmetria megmaradjon. Részecskefizikusunk szűkszavú matematikai leírást próbál készíteni arról, amit már tudunk, új elméletének előrejelzései azonban a jelenlegi kísérleti lehetőségektől igen távol eső szimmetriaelvekből fognak következni. Nem, a tudósok nem csak adatkatalógusnak tartják, és nem úgy használják az elméleteket. Nincs olyan részecskefizikus, aki összetévesztene egy elemi részecskékkel foglalkozó *elméletet* az elemi részecskék tulajdonságait felsoroló jegyzékkel, s nem korlátozna alapvető fogalmakat, mint amilyen például a „foton", pusztán mérhető vonásaira, hiszen azokban a helyzetekben, amelyekben önmaga nem mérhető – más megfigyelhető jelenségekkel kapcsolatban –, a magyarázatoknak oly gazdag tárházát kínálja.

E következtetés igazolására számos példa hozható fel: az általános relativitás elméletét Einstein színtiszta elméletként fogalmazta meg, „gondolatkísérletekre" válaszolva, nem pedig érzékszervi tapasztalatok leírásaként, hiszen abban az időben gyakorlatilag nem álltak rendelkezésére megfigyelési adatok ebben a tárgykörben. Sőt, amikor Einsteinnek két alkalommal is elméletével ellentétes megfigyelési adatokat mutattak be, arra a következtetésre jutott, hogy a megfigyelések a helytelenek (és igaza volt). A fizikai tudományok legtermékenyebb fogalmai közül sok – például a kvarkok – nem figyelhető meg. Az a tudós, aki csak gyűjti és rendezi a tényeket, olyan, mint egy bélyeggyűjtő, akinek egyedüli célja válogatás nélkül minél több bélyeget felhalmozni.

Az új kísérleti adatok mellett legfontosabb felfedezéseink a problémamegoldás új módszerei, előre nem látott kapcsolatok különböző területek között, erőteljes analógiák és új, sohasem gyanított típusú problémák – új lehetőségek, egyszersmind új tények gyűjteménye. És ha az empiristákat követve elfogadjuk, hogy csak az egyedi tényekről állítható, hogy léteznek, akkor mit kezdjünk az egyedi tények e gyűjteményének legfontosabb tagjával: különböző kölcsönös összefüggéseik és közös tulajdonságaik tényével?

Az empirizmus eleinte ártatlan okoskodásnak látszik, közelebbről megvizsgálva azonban kitűnik, hogy mindenféle zavarba ejtő következményei vannak. Ha szigorúan követnénk, számos hasznos fizikai fogalmat eleve el kellene vetnünk megfigyelhetetlensége miatt. Bárminemű általános természeti törvény is már eleve tiltott volna, mert érvényességét a gyakorlatban csak csekély számú esetben igazolhattuk. Maga a törvény sohasem volna igazolható. Mindez rövid úton a tudomány halálához vezetne. Az első számú engedmény az volt, hogy egy állítás értelmesnek tekinthető, ha más állításokkal együttesen alkalmazva igazolható következményekkel jár, de ez így végül is nem zár ki semmit.

Az operacionalista nézőpontot elfogadókat bátorította az a felismerés, hogy néhány mindennapi fogalom, amelyet a tudósok korábban nyilvánvalónak tartottak, valójában értelmetlen. Az Einstein által 1905-ben megfogalmazott speciális relativitáselmélet például megmutatta, hogy az időbeli egybeesés közkeletű eszméjének nincs abszolút jelentése. Ha eltávolodunk a fény sebességénél (másodpercenként 300 000 kilométer) sokkal lassabban mozgó testekről szerzett, korlátozott tapasztalatunktól, akkor azt a megfigyelést, hogy két esemény egyidejűleg játszódik le, más, az előbbihez képest mozgásban lévő megfigyelők már nem osztják. Ebből azt vonhatjuk le tanulságként, hogy ha egy fogalom értelmesnek hangzik, abból még nem következik, hogy az is. Az egyidejűség éppúgy relatív fogalomnak bizonyult, mint a méret. Ha egy

bizonyos szögből szemlélünk két tárgyat, az egyik nagyobbnak tetszhet, mint a másik, míg egy másik szögből azonos nagyságúnak látszhatnak. Ahhoz, hogy helyesen értelmezhessük egy tanú vallomását, aki azt állítja, hogy az egyik tárgy nagyobbnak látszott a másiknál, több adatra van szükség. Ismernünk kell, milyen mérési sorozatot hajtott végre a tanú, hogy megbizonyosodhassék a méretekről.

Valamely fogalommal szembekerülve az operacionalista azt akarja tudni: „Meg lehet-e mérni? Van-e kísérleti eljárás arra, hogy szépen, lépésről lépésre meg lehessen állapítani?" Az operacionalista mindkét kérdésre „igen" választ kíván. Ám ez ingoványos talaj, hiszen szinte minden kvantitatív tudomány a matematika nyelvén íródik, ez a nyelv pedig olyan fogalmak sokaságával dolgozik, amelyek az operacionalista által kívánt értelemben nem mérhetők vagy fizikailag nem építhetők fel. Határérték, irracionális számok, komplex számok, végtelen kicsiny és végtelen nagy mennyiségek: mindezek alapvető fontosságú fogalmak a természet matematikai leírásában és magyarázatában, de közvetlenül nem mérhetők. Sőt, ami még rosszabb, komolyan kétségbe kell vonnunk azt, vajon meg tudjuk-e mérni akár a legegyszerűbb fogalmi mennyiséget is, mint amilyen például a „hossz", úgy, hogy ezt ne valamilyen, erre a mennyiségre vonatkozó elmélet szempontjából tennénk. A tömegre, hosszra és időre vonatkozó alapmértékeinket valójában nem makroszkopikus, ember alkotta műtárgyakkal való összehasonlítással definiáljuk, hanem szubatomi alapmértékekhez képest, melyek létezését elméletileg állapították meg. Ha pedig mindent az egyedi meghatározáshoz szükséges kísérleti műveletek kirakójátékára egyszerűsítünk, akkor tagadjuk, hogy igazából bármi újat fel tudnánk fedezni. Hogyan emelhetnénk valaha is új, magasabb szintre valamely létező megértését? Még ennél is végzetesebb volna a tudománynak az a teljes széttöredezése, amelyet az operacionalista tanok alkalmazása eredményezne. Ha ugyanazt a mennyiséget más és más módszerrel mérjük, más és más mennyiségnek kell tekintenünk. A tudomány egyik módszere arra, hogy megkíséreljen megszabadulni az egyes kísérleti eljárásokban rejlő előítéletektől, a mennyiségek különböző módszerekkel való mérése és az eredmények összehasonlítása. Ez az operacionalistának meg lenne tiltva. Mivel minden kísérlet, ha csekély mértékben is, de különbözik a másiktól, minden több lépésből álló kísérletet különbözőnek kellene tekintenünk. El kellene vetnünk a természet egységességét.

Az operacionalizmus azáltal is hátba döfi önmagát, hogy nem veszi figyelembe: tudnunk kell, mi számít megengedett „műveletnek". Ahhoz, hogy idáig eljussunk, a legkülönbözőbb logikai, matematikai és fizikai fogalmakat kell bevezetnünk. Sőt mi több, el kell döntenünk, mi számít lehetséges műveletnek (szembeállítva a lehetetlen művelettel). Az operacionalistának látnoki képes-

ségekkel kell rendelkeznie. Hiszen ami ma lehetetlen, holnapra lehetségessé válhat. Az operacionalizmus összeesküvést feltételez elméleti vizsgálódásaink koronként elért szintje és kísérleti lehetőségeink között. Előírja, hogy bizonyos fogalmakat nem használhatunk, amíg nem építünk kissé érzékenyebb műszereket, amelyekkel pontosabb méréseket végezhetünk.

Az operacionalista és az instrumentalista nem úgy vélekedik, hogy a természetről alkotott törvényeinket és elméleteinket pusztán felfedezzük. Fel is találhatjuk! A megfigyelőnek nagyobb szerepet adna a játszmában, mint az empirista. Ezért ez a tudományszemlélet egy fokkal jobb összhangban van azzal, amit a tudósok ténylegesen csinálnak. De azért dilemmával áll szemben. Végső soron az instrumentalista azt tartja, hogy az elmélet semmit nem mond a világról, de annak, hogy egyes elméletek „hasznosabb" és megbízhatóbb eszköznek bizonyulnak új ismeretek szerzésében, mint mások, bizonyára az az oka, hogy tökéletesebb összhangban vannak – nem saját elvtelen képzelgéseinkkel, hanem – bizonyos megváltoztathatatlan tényekkel. A tudós csak azzal ítél egy elméletet „haszontalannak", ha azt állítja róla, hogy hamis, netán bárgyú. A „hasznosság" egyetlen érvényes kritériuma az, hogy megfelel-e a szóban forgó elmélet a tapasztalt tényeknek. A csillagjóslásnak sokrétűen hasznos pszichológiai szerepe lehet, a csillagászok mégsem hasznossága vagy haszontalansága miatt vetik el, hanem azért, mert hamisnak tartják.

Az emberi tevékenység bizonyos területein gyakran roppant fontos, hogy két, egymást kölcsönösen kizáró nézet a stabilitás érdekében egymás mellett éljen. Valaki például helyeselheti, hogy országa védelmi célból megfelelő nagyságú atomfegyverkészletet tartson fenn, és mégis támogathatja az erőszakos antinukleáris mozgalmakat. Az utóbbiak léte ugyanis számottevően fékezheti a fegyverkezést. A tudományban azonban nincsenek ilyen egyensúlyok. Bár valóban léteznek egymást kölcsönösen kizáró elméletek – például a galaxisok létezésének magyarázatára –, ám csak azért, mert egyelőre még nincs bizonyíték, amelyik egyiket a másik javára megcáfolhatná.

Az idealista állításai a legszélsőségesebbek. „A világról adott leírásotok, úgy, ahogy van, agyszülemény" – állítja –, „beleértve azt a csökönyös gondolatot is, hogy nem az." Vannak azonban e lehetőség ellen szóló, zavarba ejtő tények. Különböző kultúrákban egymástól függetlenül dolgozó tudósok ugyanazokkal a fizikai törvényekkel állnak elő. S e törvények különbözhetnek ugyan a kifejezésükre használt formalizmusban, de éppúgy ugyanazt jelentik, mint a „8" és „VIII" számjegy. Tudományos felfedezéseinknek ez az egybehangzó volta erősen afelé mutat, hogy létezik egy tőlünk független, konkrét valóság. Néha a tudósok olyan elméletekre jutnak, amelyeket ők maguk sem értenek, ami furcsa fordulat akkor, ha ezek az elméletek teljes mértékben agyunk

szüleményei; néha pedig olyan törvényeket fogalmaznak meg, melyek túlontúl zseniálisak ahhoz, hogy a természet sugallata nélkül kigondolhattuk volna őket. És vajon miért van az, hogy agyunk termékei egyes adathalmazokkal összhangban vannak, másokkal pedig nem? Minden kérdésre végtelen számú helytelen válasz van, helyes pedig csak egy. Mi az, ami agyunkat képessé teszi arra, hogy olyan gyakran a helyesnek bizonyuló választ adja? Ha az idealizmus igaz, ez a véletleneknek igen figyelemreméltó sorozatát feltételezné. És miért van az, hogy bizonyos megfigyelések zavarba ejtenek bennünket, és egyáltalán nem tudunk magyarázatot találni rájuk?

Bár az idealista szemlélet a tudóstársadalmon kívül divatos volt a legújabb korban, alapvetően mégis eléggé kezdetleges szemlélet. Az emberi gondolkodás évezredek alatt jutott el odáig, hogy már nem tekinti az embert a világegyetem középpontjának. Az idealista óriási lépést tesz hátrafelé, visszahelyezi a megfigyelő embert Kopernikusz előtti helyére: a valóság forgáspontjába.

A „szolipszizmusnak" nevezett szuperidealista szemléletet (feltehetően definíció szerint) nem lehet vitatni. Egyetlen jelentős filozófus sem védte (bár ezt talán következetessége, vagy legalábbis követői racionális gondolkodása mellett szóló érvnek tekinthetjük, hiszen a szolipszizmus egyetlen követőjének sem volna semmilyen oka védeni ezt a nézetet!). Még Berkeley püspök is, akit gyakran tartanak egy erősen idealisztikus világnézet megalkotójának, messze állt a szolipszizmustól. Ő úgy tartotta, hogy a világ örökkön létezik Isten elméjében.

A következőkben a „józan észjárású" realista szemléletet tesszük magunkévá mindaddig, amíg csak határozott, ellene szóló bizonyítékba nem ütközünk. Majdnem minden gyakorló tudós realista, legalábbis munkaidőben. Ámbár, ha őszinte, valószínűleg nem is foglalkozott sokat ezzel az üggyel, mert vizsgálatait és kutatásait nézeteitől csaknem teljesen függetlennek találta. Mégis, ha hétvégén megkérdezik, lehet, hogy nem akarja nagyon erőteljesen védelmezni a realista álláspontot. Úgy látszik, a tudományt úgy lehet legjobban művelni, ha azt hisszük: a realizmus igaz, még akkor is, ha valójában nem az. Noha ez utóbbi kijelentés furcsának tetszik, Immanuel Kantnak a természetről alkotott nézetére emlékeztet. Ő azt gondolta, hogy bár nem tudjuk bizonyítani a természet tervszerűen szervezett voltát, saját megfigyelési adatainkat úgy kell összhangba hoznunk, mintha ilyen volna. Ilyen rendszerezettség csak akkor lehetséges, ha hiszünk a „természetes tervszerűség elvének" létezésében, és úgy vizsgáljuk a természetet, mintha azt egy, a mienkkel nem azonos értelem rendezte volna el. A tudósok lényegében ezt teszik, akár vállalják nyíltan ezt az eszmét, akár nem; másképpen nem lennének tudósok. Ez magában véve is logikai nehézség a vetélytárs filozófiai szemléletek számára. Ha minden tudós

úgy dolgozik, hogy hisz a realizmus igaz voltában, akkor – az idealista nézet szerint – a realizmus *valóban* igaz; az a tény pedig, hogy a tudomány nyilvánvaló módon a realista szemlélettel űzhető leghatékonyabban, ezt a leghasznosabb, ennélfogva az instrumentalista kritérium szerint egyben a helyes szemléletté teszi.

A realista szemléletbe vetett túlzott hit mégis kifogásolható. Figyelmen kívül hagyja előítéletekkel terhes, gyakran teljesen hibás emberi megértésünk korlátait. Nem láthatjuk előre, milyen szövevényes és nehezen megfogható lehet végül is az a mögötte rejlő valóság, amelyet keresünk. Lehet, hogy szó szerint felfoghatatlan. Egy végtelen számsor határértéke gyakran olyan tulajdonságokkal rendelkezik, amelyek nem találhatók meg a hozzá vezető sorozat egyetlen tagjában sem. Sokan úgy szeretnék minősíteni realizmushoz való csatlakozásukat, hogy megkülönböztetik a magukkal a dolgokkal kapcsolatos állásfoglalásunkat a dolgokat leíró tudományos elméletekkel kapcsolatos álláspontunktól. Így például valaki realista lehet a müonnak nevezett elemi részecske létezésének megítélésében, de elméleti leírásakor pragmatikus antirealista álláspontra helyezkedhet azért, mert úgy hiszi, sohasem leszünk képesek teljesen pontos leírást adni róla. A teológusok nagyon értenek a létezők és róluk alkotott modelljeink közti ilyetén, szkizofréniára emlékeztető megkülönböztetések elfogadásához. Isten fogalmát illetően realisták, ám antirealisták minden olyan kísérlettel kapcsolatban, amelynek célja az Istenség bármilyen axiomatikus definícióval való meghatározása, ehelyett inkább azoknak a dolgoknak a felsorolását választják, amelyek nem jellemzik Őt.

Egy másik gondolatmenet is megmutatja azonban, hogy a tudósok hisznek a realizmus igazságában, tekintet nélkül arra, hogy igaz-e. Elménk és észleleteink a természetes kiválasztódás eredménye, amely a világ értelmezésének a túlélést előmozdító módszerét segített kifejleszteni bennünk. A realizmus nyilvánvalóan nemcsak a legegyszerűbb és leginkább lényegre törő (talán a leginkább angol?), hanem a túlélésre legalkalmasabb hit is. Képzeljük el a következő történetet: egy természeti nép a sűrű dzsungelben élt, melyet ellenséges szándékú lényekkel, oroszlánokkal, tigrisekkel, kobrákkal, medvékkel és hasonlókkal kellett megosztania. Na már most a törzsön belül – a British Council egyik vendégelőadója tartotta filozófiai tárgyú előadássorozat eredményeképpen (a professzort később megették) – hirtelen véleménykülönbség támadt a világról alkotott felfogásuk tekintetében. Két táborra oszlottak. A törzs idealista filozófiát valló egyik fele az erdő túloldalára költözött, és a többieket magukra hagyta régimódi realizmusukkal. Az idealista népesség lassanként megfogyatkozott. Ők azt a következtetést fogadták el, hogy a medvék, oroszlánok és tigrisek (amelyeket nem látogatott meg a filozófus, és

egyetlen idealista sem akadt közöttük) pusztán saját agyuk szüleményei. Erről tudós szemináriumokat tartottak sötétedés után a tábortűz mellett. Kardjukból ekét, lándzsájukból ágnyeső kést kovácsoltak, és fegyvertelen felderítőket küldtek ki eszméik következetességének ellenőrzésére. Egy sem tért vissza közülük. A realisták ezenközben boldogultak. Nem ápolva illúziókat a tigrisek realitásáról és realizmusáról, gyarapodtak és sokasodtak. Leszármazottaik terjesztették a világról alkotott realista elképzeléseiket, és falujukban a mai napig sem illetik kétellyel ezeket. A természeti népek világában az irrealitás bére a halál.

Kis tanmesénkben az az aggasztó, hogy eszerint a realizmusba vetett hit az evolúció folyamatában akkor is előnyben részesülne, ha nem volna igaz. Másfelől lehet, hogy a példázat meggyőz bennünket az oroszlánok és tigrisek valós voltáról. Az egyéb antirealista filozófusok különbözőképpen vonhatók be a példázatba. A nyelvfilozófusok tekintetében elsőnek emlékeztethetnénk William James megjegyzésére: „a »kutya« szó nem harap". A többit az olvasóra bízzuk.

Ezek az érvek még egy utolsó gondolatsort ébresztenek. Fel tudjuk mérni, milyen magas a túlélési értéke az idealizmussal szemben egy bizonyos erőteljes realizmusnak, amikor tudatos lények ellenséges környezetben élnek. Ha mindenki idealista, akkor vagy éhen halnak, vagy egy realista ragadozó lép a helyükbe. Ám ahogy az élet a fejlődés során az intellektuális bonyolultság mind magasabb szintjeit éri el, az élőlények számára lehetségessé válik, hogy magáról a gondolkodásról kezdjenek el gondolkodni, ahelyett, hogy csupán-csak dolgokról gondolkodnának. Ezen a fejlődési fokon törhet felszínre és maradhat fenn az idealizmus mint elvont gondolat, más, a természetes kiválasztódás által nem támogatott, elvont fogalmakkal együtt. A realizmustól az efféle okoskodásokkal szükségképpen elidegenített fejlett civilizáció azonban kétségkívül hátrányos helyzetben találná magát, ha egy filozófiailag kissé egyszerűbb beállítottságú társadalommal kerülne összetűzésbe. Lehetséges volna, hogy a szellemi fejlődés elkerülhetetlenül az idealista formához vezet, amelyet azután legyőz egy realista „ragadozó"?

Az operacionalista azzal támadhatná a realistának az elmélethez fűződő viszonyát, hogy rámutat: elméletei gyakran tartalmaznak olyan fogalmakat, amelyekről még a realista sem állítaná, hogy valóban léteznek – mágneses erővonalak, kvarkok *csoportjai* és így tovább. Ezeket azért vezették be, mert értékes segédeszközök a dolgok megismétlődéséhez. Míg a realista e kifogásokat bizonyítéknak tekintené arra: nem szabad azt állítania, hogy az elméleteket illetően realista, csak azt, hogy igenis van valami létező, amelyről elmélkedni lehet, addig az operacionalista megkérdezné, miképpen döntsük el, hogy hol

van a választóvonal az elméletekben már azonosított segédeszközök és az elméletek többi alkotórésze között, mely utóbbiaktól már bizonyosan elvárjuk, hogy „valóban" létezzenek. A realista arra is felhívná a figyelmet, hogy ugyanaz a fogalom, például az „elektron" vagy az „atom" mennyi, egymástól teljesen különböző helyzetben bizonyult hasznosnak. S ez a jelenlét mindenütt, változatos külső körülmények között, amelyeknek befolyásolni kellene az elektron vagy az atom fogalmát, ha az csak valamennyire is szubjektív volna, arra utal, hogy e fogalmak mögött a valóságnak olyan kemény magva rejtőzik, ami meghaladja a puszta hasznosságot.

A realista számára ennél nehezebben megfogható probléma, hogy el kell képzelnie: az általunk feljegyzett egyedi esetektől elkülönítve általános fogalmak is léteznek. S ez azt jelentené, hogy van valahol egy hely, ahol ezek a testetlen általánosságok elvontan léteznek, mintegy tervrajzok gyűjteményeként. Erre a dilemmára még visszatérünk, amikor a matematikának a természetben játszott szerepét vitatjuk meg.

Munkahipotézisként tehát az egyes létezők tekintetében a realista szemléletet tesszük magunkévá, az elméletek tekintetében viszont nem, és így haladunk tovább, amíg csak problémákkal nem találkozunk – és meglátjuk, találkozni fogunk. Azaz a természeti törvényeket és a tudományos elméleteket saját találmányainknak fogjuk tekinteni. Lehet, hogy ezek a valóságnak csupán megközelítései, ez a valóság azonban elménktől független. Azért alkotunk elméleteket, hogy a valóságról reális modellt kapjunk. Azt reméljük, hogy elméleteink a valóság egyre jobb megközelítését adják, és állandóan összehasonlítjuk azt, amit a világban látunk, azzal, amit modelljeink előrejeleznek, hogy meggyőződjünk arról, hogy ez a közelítés valóban végbemegy. Mindazonáltal nem tagadjuk, hogy a természetről alkotott képünk egyes elemei idealisztikusak, egyes részei pedig egyszerűen hibásak. Einstein a leghatékonyabb tudóst több nyelven beszélő embernek tekintette, akit a filozófus megalkuvónak tart, mert

> *realistának* látszik, amennyiben a világot az észlelés folyamatától függetlenül igyekszik leírni; *idealistának*, amennyiben a fogalmakat és elméleteket az emberi szellem saját találmányának tekinti (amelyek logikai úton nem vezethetők le a tapasztalatból); *pozitivistának*, amennyiben fogalmait és elméleteit csak annyiban tekinti jogosnak, amennyiben azok az érzékszervi tapasztalatok kapcsolatait logikailag ábrázolják.

Könnyű észrevenni e vitákban a természeti törvények státusát illető valódi problémát. Az álláspontok mindegyike mentes a belső ellentmondásoktól, és nincs mód eldönteni, melyikük a helyes. Egyiket vagy másikat persze előny-

ben részesíthetjük teljesen különböző okokból. Az idealista szemlélet Occam borotváját hívja ki maga ellen, mert azt állítja, hogy minden megfigyelést úgy kell kezelnünk, mintha torzító tükörbe tekintenénk. Lehet, hogy ez valóban így van, de miután semmilyen módunk nincs megtudni, milyen az eredeti valóság, minek ezzel foglalkozni? Tanulmányozzuk csak a látszatot. E rejtvény érdekes példája egy XIX. századi vita arról, hogyan lehet összeegyeztetni azt az elképzelést, hogy a Föld „fiatal", alig néhány ezer éves, az egyre nagyobb számban fellelt, igen-igen régi kövületek tanúságával. Az egyik javasolt megoldás szerint a nemrégiben teremtett Föld a látszólag nagyon régi kövületekkel együtt keletkezett. (Valamivel korábban ez a dilemma a vallásos művészetben folyó tudós vitákban jelentkezett, amikor is el kellett dönteni, hogy Ádámot köldökkel vagy anélkül kell-e ábrázolni.) Itt-ott még ma is felbukkan ez a gondolkozásmód. Számos amerikai fundamentalista ma is a Föld vagy az egész világegyetem teremtésének ezt az elavult szemléletét fogadja el. Természetesen nincs mód ezt megcáfolni, de a tudományos gyakorlat számára lényegtelen, hogy igaz-e vagy hamis, mert a tudósok akkor is úgy tanulmányoznák a világegyetemet, *mintha* valóban tizenöt milliárd éves volna, ha csak tíz éve teremtették volna látszólag tizenöt milliárd évesnek. Semmit nem mondhatunk egy olyan nehezen megfogható fogalomról, mint a „végső valóság". Mi a látszatot tanulmányozzuk, ez a *mi* végső valóságunk.

Címkék

Eh, mi a név? Mit rózsának hivnak,
Bárhogy nevezzük, éppoly illatos.

Shakespeare
(Ford. Mészöly Dezső)

Némi kikapcsolódás céljából most egy Eric Rogers tollából származó párbeszéd segítségével azt szeretnénk bemutatni, hogy egy és ugyanazon jelenségről alkotott gondolataink felszínes különbségei mennyire csak a megjelölésükre használt szavak különbözőségére vezethetők vissza.

Ön és Faust véleménye eltér a súrlódás természetét illetően. Míg ön azt állítja, hogy a guruló labdát a súrlódás állítja meg, Faust arról próbálja meggyőzni, hogy igazából egy csapat ravasz kis démon a ludas:

Ön: Nem hiszek a démonokban.
Faust: Én igen.
Ön: Egyébként sem látom be, hogyan okozhatnak a démonok súrlódást.

F.: A dolgok elé állnak, és nyomják őket, hogy megállítsák.
Ön: Még a legdurvább felületű asztalon sem látok démont.
F.: Túl picinyek, szinte átlátszóak.
Ön: De durva felületen nagyobb a súrlódás.
F.: Több a démon.
Ön: Az olaj segít.
F.: Az olajban megfulladnak a démonok.
Ön: Ha kifényesítem az asztalt, kisebb a súrlódás, és a golyó messzebbre gurul.
F.: Letörlöd a démonokat, kevesebb marad, aki nyomhat.
Ön: A nehezebb golyóra nagyobb súrlódás hat.
F.: Több démon nyomja, és a golyó jobban összetöri a csontjaikat.
Ön: Ha érdes téglát teszek az asztalra, mind nagyobb és nagyobb erővel tolhatom a súrlódás ellenében, bizonyos határig, és a tömb egy helyben marad, a súrlódás éppen egyensúlyban van a tolóerőmmel.
F.: Persze a démonok éppen annyira nyomják a téglát, hogy megakadályozzák elmozdulását, de erejük véges, és bizonyos határon túl nem bírják tovább.
Ön: De amikor elég erősen tolom, és végül elmozdítom a téglát, akkor is van súrlódás, amely a mozgó téglát lassítja.
F.: Igen, amint a démonok összeestek, a tégla összezúzza őket. A csúszást az ő összetört csontjaik lassítják.
Ön: Nem érzem.
F.: Dörzsöld végig az ujjadat az asztalon!
Ön: A súrlódás meghatározott törvényeket követ. Például a kísérletek szerint az asztalon végigcsúszó téglát a súrlódás a sebességtől független erővel húzza vissza.
F.: Hát persze, ugyanannyi démon zúzódik össze, akármilyen gyorsan gázolod is el őket.
Ön: Ha újra és újra végighúzok egy téglát az asztalon, a súrlódás minden esetben ugyanakkora. A démonokat már az első húzás összetörné.
F.: Igen, de hihetetlenül gyorsan szaporodnak.
Ön: A súrlódásnak más törvényei is vannak: például a visszahúzó erő arányos a felületeket együtt tartó erővel.
F.: A démonok a felület pórusaiban élnek: nagyobb nyomás hatására többen rohannak elő, hogy nyomjanak és összezúzódjanak. A démonok éppen úgy nyomnak és húznak, mint a kísérleteidben azonosított erők.

És így tovább...

Faust gondolata nyilvánvalóan hasznos eszköz egy törvényrendszer kidolgozásához. Ahol ön egy súrlódási „törvényt" fogalmaz meg, ott ő a démoni társadalomtudomány egyik új szabályát. A fenti párbeszéd szövegösszefüggésében a kétféle javasolt leírás lényegében megkülönböztethetetlen egymástól. Az egyik „tudományosnak" és helyesnek látszik, míg a másik (reméljük, hogy a démonos) őrültségnek tűnik föl a gondolatoknak a párbeszéd összefüggésein kívül eső jelentése miatt. Vigyáznunk kell, hogy ne olvassunk bele a terminológiai különbségekbe holmi jelentékenyebb tartalmat. A „természeti törvény"

fogalmával nagyon könnyen megesik az ilyen visszaélés. A deista gyakran Isten tevékenységének akarja betudni a természeti törvényeket, sőt egyenlővé is teheti őket Istennel. Az ateista a világegyetem működését a „logikának" vagy a „következetességnek" tulajdonítja, ám a körülhatárolt tudományos szövegösszefüggésben ezek mind csak egyenértékű elnevezések, mint a démonok és a súrlódás atomi elmélete.

Véletlenszerű, jogi és statisztikai törvények

> Mivel a törvények fogalmakra, feltevésekre és kísérletekre épülnek, semmivel sem pontosabbak vagy megbízhatóbbak, mint a definíciók megszövegezése és a bizonyítékként szolgáló kísérletek pontossága és hatóköre.
>
> Gerald Holton

A „törvény" szót annyiféleképpen használják a társadalomban, amelyben élünk, hogy fontos volna rámutatni e köznyelvi használatok és a természeti törvény eszméje közti néhány hasonlóságra és különbségre. Már említettük a természeti törvények kettős jelentését, vagyis azt, hogy vagy úgy tekinthetjük őket, mint amelyek leírják a természetes történéseket – azaz mint *hatást, okozatot* –, vagy pedig úgy, mint olyan szabályrendszert, amely meghatározza, mi fog történni – azaz mint *okot*. Az első alternatíva a természeti törvény rangjára emelt kijelentéseket semmi többnek nem tekinti, mint szellemi gyorsírásnak meghatározott események sorozatának jelölésére, amelyek gyakran egymás után következnek be, tehát gondolkodásunk és megfigyeléseink alapvető fontosságú termékének. Ezzel azonban nem érhetjük be, mert még nem zárja ki a véletlenszerű általánosításokat. Megfigyelhetem például, hogy az utcánkban minden gyereknek van biciklije, vagy hogy a Föld színén nem létezik száz tonna tömegűnél nagyobb gyémánt. E megfigyelések tapasztalatunk pontos leírásai lehetnek, de éppúgy nem akarnánk természeti törvénynek nyilvánítani őket, mint ahogy egyetlen csillagász sem tekintené Bode-nak a bolygók Naptól mért távolságára vonatkozó szabályát Newton gravitációs törvényéhez hasonló fontosságúnak. A leíró megközelítés híve azzal vághat vissza, hogy Newton törvénye véletlenül nagyon jó törvény, amely sokkal szélesebb körben, sokkal érdekesebb eseményeket ír le, mint az én biciklitulajdonosi vagy gyémántnagysági törvényem, avagy Bode szabálya a bolygók távolságáról – ezek ugyanis rossz törvények. Mégis a Newtonéhoz hasonló törvények rendkívüli általánossága és hatásköre (még ha tudjuk is, hogy

valamelyest „eresztenek", pillanatnyilag vegyük úgy, hogy minden ismert megfigyeléssel összhangban vannak) azt sugallja, hogy valamilyen szükségszerű, nem pedig véletlenszerű általánosságot foglalnak magukban vagy írnak le. Látjuk, hogy az olyan állítások, mint Newtoné, melyet a többi példa fölé emelünk, feltételes megfogalmazásúak: „ha..., akkor". Arra vonatkozó szabályok ezek, hogy milyen hatás következik egy adott okból; vagy olyan kapcsolatok, amelyeknek különböző mennyiségek között bizonyos körülmények esetén fenn kell állniuk, vagy pedig funkcionális kapcsolatok, melyek megmondják, hogyan fog egy mennyiség változni, ha egy másiknak megváltozik az értéke, vagy hogyan változnak mennyiségek térben és időben bizonyos tényleges hatások következtében. Ezeknek az előírásoknak közös vonása, hogy a „ha..., akkor" nyelvi formába önthetők: *ha* egy tárgyra ható erő megduplázódik, *akkor* a tárgy gyorsulása is megduplázódik; *ha* egy elszigetelt térben lévő gáz nyomása és térfogata adott, *akkor* Boyle törvénye megadja hőmérsékletét; *ha* két bolygó kering az űrben, *akkor* a közöttük ható gravitációs vonzás távolságuk négyzetével fordítottan arányos.

Első látásra úgy tetszik, hogy a biciklitulajdonosokról alkotott véletlenszerű leíró törvényünk („az én utcámban minden gyereknek van biciklije") eléggé hasonlít más természeti törvényekre, melyek *bármilyen A-ra kimondják, hogy ha az B, akkor C-nek kell lennie.* Ha egy gyerek az én utcámban lakik, akkor biciklitulajdonosnak kell lennie. S ez éppen úgy hangzik, mint Newton törvénye: ha bármilyen tárgyat veszünk, és megkétszerezzük a rá ható erőt, akkor megkétszerezzük gyorsulását. Az általtörvények, mint az én biciklitulajdonosi „törvényem", azonban nem állják ki az ellenkező tény próbáját. Nem lehet belőlük ezt a formát levezetni: *ha A B volna, akkor A C lenne.* Például nem feltétlenül igaz, hogy „ha az a gyerek (aki egy másik utcában lakik) az én utcámban lakna, akkor lenne biciklije". De ha egy tárgyra (amennyiben a rá ható erő még nem duplázódott meg) kétszer akkora erő hatna, megduplázódna a gyorsulása. A véletlenszerű szabályosságokról szóló, tisztán leíró állításokból viszont nem következnek ilyen tényellentétes, feltételes állítások.

A természeti törvények tisztán leíró szemléletének másik hiányossága, hogy azt sejteti: a tudósok csak a természet pontos leírására törekednek. Ez éppen olyan szegényesen hangzik, mint az az elképzelés, hogy a művészek egyedüli célja modelljeik fotográfiai pontosságú visszaadása – pusztán másolat készítése a természetről, ami aztán vagy jó, vagy rossz. Sehová sem vezet. Kiválasztjuk a megfigyelt vonásoknak egy tényleges csoportját, amelyek valamilyen módon kapcsolódni látszanak egymáshoz, másokat viszont, melyeket a vizsgált jelenség szempontjából lényegtelennek tartunk, elhanyagolunk. Soha nem próbálunk meg mindent leírni, ami egy adott kísérlet közben történik. A

tudományos törvények a gyakorlatban egyszerre leírnak, magyaráznak és előrejeleznek. Nincs értelme ennek további pontosításával próbálkozni, mert különböző alkalmakkor mindeme minőségeikben használjuk őket.

Gyakran idézett szólás, hogy a jogi törvények megmondják, hogyan viselkedjünk, a természeti törvények pedig azt mondják meg, hogyan is viselkedünk. A természeti törvény megszegéséért látszólag nem jár büntetés, és tulajdonképpen nem is lehet megszegni őket. A jogi törvényeket azonban újra lehet fogalmazni, hogy nyilvánvalóvá váljék a kettő közötti szorosabb kapcsolat. A sebességkorlátozás összekapcsolható azzal az állítással, hogy ha a vezetők nem korlátozzák sebességüket az országúton, akkor túlélésük esélye csökken. Ebben az értelemben a viselkedésünket korlátozó jogi kényszer statisztikai formába öntött, elvont evolúciós törvény. Ha a viselkedési törvényeket elég gyakran megsértik, bizonyos következmények nagyobb valószínűséggel következnek be.

A valószínűség ilyetén beépítése a dolgok leírásába elvezet a természeti törvények egy másik lehetséges felfogásához: Vajon a természeti törvények csupáncsak statisztikai állítások? Később valóban látni is fogjuk, hogy sok makroszkopikus jelenség megfigyelt állandósága és ellentmondásoktól mentes volta mögött a közös tényező a véletlen. A világról szerzett tudásunk nagyrészt statisztikus jellegű. Az anyag viselkedését leíró mechanikai szabályokat másként, mint statisztikusan nem tudjuk igazolni. Méréseink nem lehetnek százszázalékos pontosságúak, elkerülhetetlen a bizonytalanság, ami csak azáltal csökkenthető, hogyha a mérést sokszor megismételjük hasonló körülmények között. A bolygók mozgását leíró törvényeink hosszú időn át gyűjtött adatok átlagán alapulnak. Csábító az a következtetés, hogy ha végül megfogalmazunk is statisztikus természeti törvényeket, akkor ennek egyedül az az oka, hogy a pontos törvényeket egyelőre nem ismerjük. Ám egyformán jogos a következő érvelés is: csak áltatjuk magunkat azzal, hogy lehetséges pontos törvényeket alkotni, mert a világot nagyon „durva szemcsés" módon tekintjük, nem látva meg a természetében valóban statisztikus, mikroszkopikus hatások hatalmas tömegét.

Egy pontos törvényt persze sohasem lehet egyértelműen igazolni, csak meghatározott pontossággal. Másfelől viszont megfigyelés útján kétségtelenül megcáfolható. A statisztikai törvénynek nincs meg ez a tulajdonsága: soha nem lehet megcáfolni, mert mindig fennáll annak lehetősége, hogy a megfigyelések sorozata a jövőben másképpen alakul. A statisztikai törvény semmit nem mond az egyes jövőbeli eseményekről. Statisztikai törvény például az, hogy a hibátlan érme végtelen számú feldobásnál ugyanannyiszor esik fej, mint írás oldalával felfelé, de ez az azonos valószínűség semmi olyat nem közöl, amiből a következő feldobás eredményét megjósolhatnánk.

A következő fejezet egyik üzenete, mint látni fogjuk, az lesz, hogy régebben a kiemelkedő tudósok gondolkodásában szorosabb volt a kapcsolat a jogi és természeti törvények eszméje között. Nyugaton sokan úgy hitték, hogy a természeti törvényeket egy isteni törvényalkotó rendelte el. Utóbb még az is felmerült, hogy ez a szemlélet kulcsszerepet játszhatott a tudományok sikeres fejlődésében a nyugati kultúrákban, ami azért történhetett így, mert e kultúrákat a zsidó-keresztény hagyomány befolyásolta, mely táplálta a természet ésszerűségébe és rendezettségébe vetett hitet azokban a történelmi korszakokban, amelyekben az emberi eszméket a legkülönfélébb mágikus és okkult elképzelések hatották át. Ha az ember természeti istenekben hisz, nehéz különösebb lelkesedést kelteni benne az iránt, hogy a természet működésének szabályszerűségeit tanulmányozza. A nyugati hagyomány, amely a természeti törvényeket Isten akarata és az Ő világrendet fenntartó tevékenysége megnyilvánulásának tekintette, némileg mégis összezavarodott ezen a téren. Newton nagy felfedezései után már mindennapossá vált Isten létének és személyiségének példájaként idézni a természet szabályosságait, „ama törvényeket, melyek megtörhetetlenek, hiszen Ő alkotta azokat" (ahogy a híres egyházi énekben áll). Kétes és szubjektív jellegű egyedi események helyett a természeti teológia művelői inkább a mechanikus órához hasonlított világ *szabályosságait* irányító törvényeket szemelték ki, hogy a világban rejlő isteni értelem léte melletti érvként említsék fel őket. Paradox módon azonban – e szószólókkal egyidejűleg – más teológusok az Istenség léte mellett szóló érveiket a csodák bizonyságára alapozták, azaz éppen a természet törvényeinek és szabályosságainak megsértésére. Manapság az efféle érvek mind a tudósok, mind a teológusok körében kimentek a divatból. Ugyanúgy a lomtárba kerültek, mint a középkoriak vonzódása az Isten léte mellett szóló furcsa, ontologikus okoskodások iránt, amelyek azért annyira kevéssé meggyőzőek, mert olyan teológusok éltek velük vitáik során, akiknek saját hite nem ezekre az érvekre alapozódott. Isten létébe vetett személyes hitük egészen más alapokon nyugodott. Isten létére vonatkozó tudományos vagy filozófiai „bizonyítékaik" megdöntése egy mákszemnyivel sem gyengítette volna saját hitüket. Ezért nem kellett volna azt várniuk, hogy „bizonyítékaik" másokat véleményük megváltoztatására késztetnek.

Érthetőség

A tárgyi világ hétköznapi értelmezését minden korban valamilyen kétségtelen, gyanún felül álló feltételezés uralja, és az egyén elméje – bármennyire úgy érzi is, hogy nem ért egyet kortársaival – nem elszigetelt rekesz, hanem inkább öbölhöz hasonló egyetlen, folyamatos közegben – saját helyének és korának őt övező roppant óceánjában.

A. N. Whitehead

Az egyik dolog, ami a tudományt annyira vonzóvá teszi, az az, hogy a természetes világ oly „érdekesen" van megalkotva. Ezen azt értjük, hogy szerkezete nem olyan bonyolult, hogy tanulmányozása eleve kudarcra ítélt, reménytelen feladat volna, sem nem olyan egyszerű, hogy egyhamar végeznénk vele, és magától értetődőnek találnánk, mint egy keresztrejtvényt. Egyszerre kihívó és megoldható probléma. A tulajdonságok e társítása különösen vonzó az emberi elme számára, amint ezt a Rubik-kockához hasonló fejtörő játékok hihetetlen kereskedelmi sikere is tanúsítja. Amikor más fejtörők megoldásának látunk neki, ezt kivétel nélkül abban a hiszemben tesszük, hogy bizonyos alapszabályok betartatnak. Számítunk arra, hogy a mozaik összes darabja megvan. Feltételezzük, hogy a barkochba játékban létezik az, ami kitalálandó. Feltételezzük, hogy a Rubik-kocka megoldható a kiindulási helyzetből. E feltételezések annyira megszokottak, hogy nem is gondolunk rájuk.

A tudományos gyakorlat is számos, a valóság természetéről alkotott feltételezésen alapszik. Általában magától értetődőnek tekintjük őket, ami nemcsak öntudatlan megszokottságuk miatt van így. Polányi Mihály észreveszi, hogy

> a tudomány metafizikai előfeltevéseit magukat... a kutató tudós nyíltan sohasem védi, sőt nem is veszi fontolóra. Ezek az *adott* kutatási tevékenység egyik oldalaként, szerkezetileg ahhoz tartozó feltételezésként jelentkeznek, nem azt megelőző, tudatosan vallott filozófiai axiómaként. A módszertani gondolkodás transzcendentális előfeltételei ezek, nem pedig kifejezett tárgyai; ezek*kel* gondolkodunk, nem ezek*ről*.

Ezek az előfeltevések képessé tesznek bennünket arra, hogy a lehető leghatékonyabban haladjunk a világ egyszerű tapasztalásától a világról való tudás felé. A legnyilvánvalóbb feltételezések a következők:

1. Létezik egy külső világ, mely elménken kívül helyezkedik el, és érzeteink egyetlen forrása.

2. Ez a külső világ végső fokon racionális. „A" és „nem A" nem lehet egyidejűleg igaz.
3. A világ lokálisan elemezhető, mégpedig anélkül, hogy alapvető szerkezetét lerombolnánk.
4. Az elemi létezők nem rendelkeznek azzal, amit szabad akaratnak nevezünk.
5. Az események elválasztása attól, hogy mi észleljük őket, ártalmatlan leegyszerűsítés.
6. A természetben vannak szabályszerűségek, melyek bizonyos értelemben előre láthatók.
7. Létezik tér és idő.
8. A világ matematikailag leírható.
9. Ezek az előfeltevések mindenhol és mindenkor egyformán érvényesek.

Az első feltételezés megvéd a szolipszizmustól, és elismeri egy olyan kutatási tárgy létét, amely fittyet hány szabad akaratunk szeszélyeire. A második fáradságot megérő tevékenységnek nyilvánítja a tudományos vállalkozást, és feltételezi, hogy a külső világot kormányozó törvényeknek vannak közös vonásaik az elménk működését szabályozókkal. Érdekes felidézni, hogy Kurt Gödel megmutatta: be lehet bizonyítani, hogy az aritmetikán alapuló matematikai rendszerek tartalmaznak olyan állításokat, amelyek e rendszerek szimbolikus nyelvén kifejezhetők, de igaz vagy hamis voltuk e nyelven belül nem bizonyítható. Nem minden, az aritmetika nyelvén tett állítás igaz, és ennélfogva az aritmetika ellentmondásmentes lehet. Ez annak folyománya, hogy ellentmondásos rendszerekben bármilyen állítás bizonyítható.

A harmadik axióma több reményre jogosít. Azt kívánja, higgyük el, hogy a világot lokálisan, a tér vagy az idő kis szeleteiben vagy szakaszaiban tanulmányozhatjuk, és e kis méretekben nyert vonásokat összerakva a teljes szerkezetre következtethetünk. Ha a világ inherensen holisztikus jellegű volna, ez az állítás nem lenne igaz. A Rubik-kockához vagy a zsonglőrködéshez hasonlítana: olyan probléma lenne, amelynek csak egészében van értelme.

A negyedik valójában kettős feltevés; az első, hogy vannak elemi létezők, a második, hogy ezek valamiféle szabályoknak engedelmeskednek, amelyeket nem képesek befolyásolni, s ezért előre jelezhetők, függetlenül attól, hogy az előrejelzés oksági összefüggésben áll-e ezekkel a létezőkkel.

Az ötödik feltételezés évszázadok óta álmatlan éjszakákat okoz a filozófusoknak. Azt állítja, hogy a világ megfigyelésének aktusa nem változtatja meg lényegesen annak belső jellegét. A realista ebben hisz. Amint fentebb jeleztük, akár igaz ez, akár nem, ahhoz, hogy hozzáláthassunk a tudomány műveléséhez, fel kell tételeznünk, hogy igaz.

A hatodik feltételezés tudományos módszerünk alapja. Nem ítéli meg előre, hogy ezek az előrejelzések pontosak vagy statisztikusak lesznek-e, vagy hogy egyáltalán korlátozva lesznek-e valamilyen lényeges tekintetben. Lehetővé teszi azt is, hogy kísérleti előrejelzéseinket megcáfoljuk. A hetedik feltevés elismeri, hogy a tér és idő a világról nyert tapasztalatunk feltétele, s így nem vezethető le ebből a tapasztalatból. Valahol el kell indulnunk.

Nyolcadik feltételezésünk furcsa szerzet, amelyet az egyik későbbi fejezetben részletesebben fogunk tárgyalni; a világról szerzett – meglehet, eléggé korlátozott – tapasztalatunk terméke ez. A matematika az általunk ismert legkifinomultabb nyelv, amely belső logikával és a saját korlátaira való következtetés képességével rendelkezik. Recept az analitikus igazságok vagy tautológiák leírására, és a tudomány annak kimutatására törekszik, hogy ezek különféle természeti eseményekkel tehetők egyenlővé, amelyek látszatra nem analitikus vagy nem tautologikus igazságok. Jelenleg a természetről való minden pontos tudásunk lényegében matematikai jellegű, de nem lehetünk bizonyosak abban, hogy ez a világ belső jellegéről tanúskodik-e, vagy csupán arról a tényről, hogy eddig pusztán a matematikai tulajdonságokat voltunk képesek módszeresen megtalálni.

Végezetül a kilencedik pont annyit tesz, hogy osztjuk azt a hitet, mely szerint az általunk felfedezett világ végső szerkezete nem függ attól, hol vagyunk a világegyetemben, sem attól, mikor vizsgáljuk azt. Az események, amelyeket látunk, a mennyiségek, amelyeket mérünk, és a feltételek, amelyeket tapasztalunk, természetesen változhatnak a megfigyelés helyével és idejével, ám a természet alapvető törvényei nem. Ez a meglehetősen spekulatív feltevés alapvető fontosságú a Földön kívüli jelenségekkel foglalkozó tudományok előrehaladásához. Ahhoz, hogy különböző helyeken és időkben összehasonlítható kísérleteket végezhessünk, szükséges feltételeznünk, hogy a természetet lokálisan kormányozó törvények globálisan is érvényesek. Csak így mondhatja a tudós Hamlettel: „egy csigahéjban ellaknám, s végtelen birodalom királyának vélném magamat..." (Ford. Arany János).

E kilenc állításnak nem mindegyike teljesen független, és a felsorolás bizonyára nem szükségszerűen teljes vagy véglegesen helyes. Arra szolgál, hogy az olvasóval megértesse az átlagos gyakorló tudós gondolkodásmódját. Ámbár a feltevések legtöbbjét magától értetődőnek véljük – abban az értelemben, hogy nincs más választásunk, mint hogy elfogadjuk őket vezérelvül, ha egyáltalán haladást akarunk elérni –, a következő fejezetben látni fogjuk, hogy az egyikük-másikuk elfogadásától való vonakodás miképpen vezetett oly sok kultúrában a tudomány iránti korai érdeklődés idő előtti kioltásához. A világ tanulmányozása iránti vágynál többre lehet szükség valamely kultúrában

ahhoz, hogy tagjainak egy szűkebb csoportjára rábízza akár csak a legalapvetőbb feltételezéseket is a világ racionalitásáról. A kíváncsiság önmagában nem elég.

A következő fejezetekben a kilenc axiómába vetett bizodalmunk fokozatos megrendülését tapasztaljuk majd. A kutatók, hacsak nem abból a feltételezésből indulnak ki, hogy ezek az axiómák igazak, sohasem juthatnak egyértelmű bizonyossággal arra a következtetésre, hogy hamisak. Ez a folyamat lényegében a klasszikustól a modern fizikához vezető út. Mielőtt azonban továbbhaladnánk ezen az ösvényen, vissza kell mennünk legvalószínűbb kezdetéhez.

2

Régmúlt idők

Azt mondják, hogy bár Isten nem tudja a múltat megváltoztatni, a történészek igen; talán éppen azért tűri meg őket az Úr, mert e tekintetben hasznára lehetnek.

Samuel Butler

Kezdetek

Az ébrenlévőknek egy és közös a világuk, az alvóknak mindegyike pedig külön világba lép.

Hérakleitosz
(Ford. Kerényi Károly)

A természeti ember belenyugodott abba a felismerésbe: jóléte elválaszthatatlan attól a képességétől, hogy a kíméletlen és versengő világban környezete változó elemeit legyőzze, előre lássa és saját előnyére kiaknázza. Kialakult szemlélete szerint ezt a világot nem külsőnek tekintette, hanem inkább attól a szenvedélytől és egyéniségtől lüktetőnek, amelyet önmagában és társaiban látott. Személyes érzései és tapasztalatai hasonlóképpen kozmikus jelentőséget nyertek. Mindenben személyes szellem lakozott. A világ csak saját elméjének egyik megnyilvánulása volt. Élettelen tárgyak nem voltak. Az álmok éppoly valódiak voltak, mint a viharok. Minden jelenségnek sok-sok különböző belső jelentése volt, olyanok, amilyeneket ma csak a festészet, szobrászat vagy költészet szimbolikus ábrázolásaiban kapcsolnánk hozzájuk. A természeti ember nem tekintette magát az elvont természettől különállónak. Gyakran úgy tűnik föl, hogy a dolgokat emberi tulajdonságokkal ruházzuk fel, ám ez azt feltételezi, hogy e dolgok olyan értelemben különböznek tőlünk, amelyet ősünk nem ismert volna fel.

Manapság távoli nézőként, nem pedig valódi résztvevőként érdeklődünk az okkultizmus iránt. Nem tudjuk méltányolni, milyen lehetett egy teljességgel mágikusnak tekintett világban elmerülve élni.

Eleinte az ősember is csak saját kárán, tapasztalatai következményeiből tanult, mint az állatok. Ahogy észrevette a napok és évszakok szabályszerűségeit, fokozatosan megtanulta felismerni azokat a dolgokat, amelyek mindig másokból látszanak következni. Felfedezte, hogy nem minden esemény következik be egymástól független, önkényes módon, hanem az események bizonyos fokú előrejelezhetőséget mutatnak, amelyet előnyösen ki lehet használni. Megtanulta lehetséges jövőbeli tetteinek eredményét azáltal modellezni, hogy gondolkozott felőlük. Ha valamilyen viselkedés eredményének kedvezőtlen volta előrelátható volt, el tudta kerülni. Többé nemcsak hibái következményeiből okulhatott. A világ tapasztalásától eljutott a róla való gondolkodásig.

Az antropológusok felfedezéseiből megtudtuk, milyen közös feltevésekben osztozott nagyszámú ősi kultúra. Kezdettől fogva megvolt a természet egységességébe meg az ok és okozat egymást követő voltába vetett hit. E szavaknak ismerős, újkori csengése van, de e fogalmak nem tudományos kísérletek, hanem varázslat gyakorlása során alakultak ki. S ez elsőre különösnek tetszik: Ha a varázslat a középponti hit, akkor ugye abban kell hinni, hogy bármi megtörténhet? Ám ez nem szükségszerűen igaz. Az esőtánc esőt hoz, a termékenység istenének bemutatott áldozat bőséges termést, a háború istenének ünneplése pedig győzelmet az ellenség felett. Az ilyen egyszerű képleteken valódi, noha rossz helyre irányzott hit süt át, egy rendezett és előrelátható világ eszméjébe vetett hit, ahol bizonyos cselekedetek kivétel nélkül bizonyos tényleges hatásokat váltanak ki. Az efféle mítoszteremtő kultúrákban teljes determinizmus uralkodott. Semmi sem történt ok és cél nélkül; mindennek megvolt az értelmezése. A véletlen fogalma fel sem merülhetett.

Az a szokásunk, hogy úgy gondolunk okra és okozatra a természetben, mint valaminő személytelen törvények következményére, a legősibb kultúráktól idegen. Mivel úgy látszott, hogy a személyes és a szubjektív nem különül el a természet dolgaitól, minden eseményt valami vagy valaki szándékos tettének tulajdonítottak: például a jó és rossz ellentétes erői közti összeütközések kimenetelének. Ahol mi megelégszünk azzal, hogy a külvilág egyetlen, elszigetelt eseményét, annak okát és hatását vizsgáljuk, ott a hajdani elme mindent egyetlen nagy szövevénnyé szőve látott, melyet egy történet fejezett ki. Ahelyett, hogy az érzékelhető eseményeket elemezték volna, inkább a teljes egészbe igyekeztek megnyugtató módon beilleszteni őket. Ez a tevékenység az előfutára annak, amit mi absztrakt gondolkodásnak nevezünk: jelek és szimbólumok kezelése ellentmondásmentes, logikus módon, bizonyos szabályok szerint. A hajdanvolt ember egy további tekintetben is különbözött tőlünk, mégpedig abban, hogy hová helyezte a hangsúlyt az ok és okozat

problémájának megközelítésében: a természetben az egyénire, a különlegesre összpontosított ott, ahol mi a szabályszerűt keresnénk. Napjaink meteorológusa számára a lényeges kérdés ez: „Miért esik az eső?" – a természeti ember számára azonban ez volt: „Miért esik *itt* és *most*?" Ez az, ami számít, ha az eseményeket csak tapasztalják, nem pedig tanulmányozzák. Az ősember a természetben résztvevő volt, nem pedig megfigyelő. A görögök vezették be elsőként a „teória" eszméjét, azt a fogalmat, amely az olimpiai játékokon a versenyzés helyett a versenyzés gondos megfigyelésének gyakorlatából vezethető le. Az újkori nyelvekben e szónak egyik származéka, a „teátrum" tartotta meg az eredeti jelentést. A hajdanvolt ember színész volt egy kozmikus drámában, színpada pedig az egész világ.

A mágikus eszméket nem könnyű megdönteni. Hogyan lehet megcáfolni azt az elgondolást, hogy az esőisten szertartásos segítségül hívása okozza az esőt? Ha az eső nem jön, akkor vagy rosszul végezték a szertartást, vagy pedig valamilyen hatalmasabb varázserő hatástalanította. Miért? Mert a varázsló ezt mondja.

A mágikus szemlélet a közösséget két csoportra osztja: az egyik csoport az értelmezés tudományába és az okkult praktikákba beavatottak belső köre, a másodikba pedig a többiek tartoznak, azaz mindenki más. A második csoportba tartozók semmi mást nem tehetnek, mint eltűnődhetnek azon, hogyan csinálják a többiek. Nagyon nehéz bárkinek is kimondania: „a császár meztelen", és még nehezebb, hogy bárkinek is oka legyen rá, hogy ezt ki is akarja mondani.

Úgy látszik, hogy ezek a korai törzsi kultúrák egy másik típusú feltételezést is osztottak, amit mi nem: azt az elképzelést, hogy azok a dolgok, amelyek egy alkalommal megérintették egymást, a későbbiekben valamiféle eleven kapcsolatban maradnak egymással. Ez a nézet természetes, ha valaki egy egymással harcban álló szellemekkel benépesített világban hisz. Ha találkozunk valakivel, nem őrizünk-e meg valamilyen benyomást a találkozásból? Benyomásunk pedig befolyásolja későbbi gondolatainkat és viselkedésünket. Következésképp, nem természetes-e abban hinni, hogy tárgyak, sőt emberek is irányíthatók olyan dolgok segítségével, amelyek vagy hasonlítanak rájuk, vagy korábban „testi" kapcsolatban álltak velük? Ezeket a tárgyakat nem ama személy jelképének tekintették, akitől elvették őket: maguk voltak az a személy. Ha ezen eszmék közül az első az emberek vagy állatok csoportján belüli rokonság vagy csordaösztön megfigyeléséből eredt, akkor talán ez kísért még az öröklött és szerzett tulajdonságok viszonylagos fontosságáról folytatott vitáinkban. Az Antillák egyes helyein, ahol a vodu praktikák fennmaradtak, ma is él a hit mások irányításának lehetőségében képmás készítése által,

amelyek általában egy hajszálat vagy valamilyen más emberi eredetű alkotóelemet tartalmaznak. (A „rontás" kifejezésnek ez az eredeti jelentése: valakit megrontani azt jelentette, hogy ilyen módon hoztak rá balszerencsét.) Ez a szimuláció eszméjére utal, amelyet a modern tudósok oly sikeresen hasznosítanak. A tudós a természet valamely részéről gyakran „modellt" épít, legyen az akár egy papírlapra firkált kacskaringós matematikai képlet, akár a viselkedés elektronikus újraalkotása a számítógépben, és ez a szimuláció hozzásegíti a valódi dolog megértéséhez és irányításához. Rendkívül lényeges, hogy az ősi hit felmutatja azt az eszmét, hogy valaminek a része magában hordozza az egész lényegét.

A legutolsó, meglehetősen általános feltételezés a világról, amelyet fel kell ismernünk, az a hit volt, hogy a dolgok megnevezése a megnevezőt hatalommal ruházza fel e dolgok felett. Ez nyilvánvalóan ősi zsidó hiedelem volt, melyet a környező kultúrák is osztottak, amint ezt a Teremtés könyvében az állatok megnevezésének különös jelentősége, amely Ádám felettük való „uralmának" jele volt, a Jákobnak adott új név, valamint a zsidó tilalom Isten nevének kiejtésére is tanúsítja. Az egyiptomiak úgy próbálták legyőzni ellenségeiket, hogy vezéreik nevét cserépedényekre karcolták, majd az edényeket szertartásosan összetörték. Úgy hitték, hogy ez a tettük valódi fájdalmat okoz ellenségeiknek. Még írásos emlékek is maradtak fenn egy összeesküvésről, amelyben (valamelyik) Ramszesz fáraó családtagjai úgy próbálták meggyilkolni a fáraót, hogy képeket készítettek róla, majd összetörték azokat.

A névnek az elnevezettel való ilyetén összekapcsolása talán abból a gyakorlatból eredt, hogy a szülők gyermekeiket születésükkor elnevezik, majd saját útjuk követésére nevelik fel őket, ilyképpen a szülők és gyermekek közös testi és jellemvonásai annak a hitnek adtak tápot, hogy a születés utáni névadás különleges kapcsolatot teremt közöttük. Másfelől ugyanilyen hihető az is, hogy a szülői névadás szokása a névadónak az elnevezett feletti hatalmába vetett, még kezdetlegesebb hiedelmek következménye. Sohasem fogjuk megtudni. (Csábító eltűnődni azon, hogy vajon nem a nyelvfilozófusok és empiricisták-e azok, akik ezt a sajátos okkult hiedelmet örökölték?) Még ma is különös kulturális különbségek léteznek a személynév használatában. Az Egyesült Államokba első ízben látogató angol számára az egyik legnyugtalanítóbb dolog az, ahogy vadidegenek, sőt számítógépek is azonnal a keresztnevükön szólítják őket.

Ezek az elmélkedések csupán azért érdekesek, mert az újkori kísérleti tudományok egyik előfutára a varázslás volt. Még a XVIII. században is, még az olyan nagy tudósnak is, mint Newton, furcsa, mágikus elképzelései voltak, amelyek az általunk is elfogadott newtoni matematika és fizika mellé helyezve számunkra

teljesen idegenek. Newton azonban egész munkásságát, legyen az matematika vagy optika, alkímia vagy bibliakritika, egyetlen vállalkozás részének látta, és ez a furcsa eklekticizmus sarkallta Keynest arra, hogy ezt írja:

> Newton nem az ész korának első alakja volt. Az utolsó varázsló volt, az utolsó babiloni és sumér, az utolsó nagy elme, aki a látható és szellemi világra ugyanazzal a szemmel tekintett, mint azok, akik szellemi örökségünket csaknem tízezer évvel ezelőtt építeni kezdték.

Az, hogy mit tekintenek mágikusnak, időben változó. A középkor embere nem tartaná-e a mai tudomány technikai eredményeit megkülönböztethetetlennek a varázslatról alkotott elképzelésétől? A „connecticuti jenki Arthur király udvarában" Merlin vetélytársa volt, nem pedig a király mérnökeié és filozófusaié. Mégis helytelen volna úgy érvelni, hogy a varázslás csupán az újkori kísérleti tudomány előfutára volt. E fejezetnek egyik célja, hogy szemléltesse: mennyire a kultúrán belüli szélesebb hiedelemrendszer határozza meg, hogy az adott kultúra termékeny talaja-e a tudomány fejlődésének. A varázslás gyakorlata valóban a kísérleti technika egyik formája volt, de olyan hiedelemből eredt, amely az újkori tudomány számára idegen – abból ugyanis, hogy a természet természetes menetét valahogyan meg kell változtatni vagy el kell torzítani ahhoz, hogy felette vagy más személyek felett hatalomhoz juthassunk. A varázslás ősi gyakorlata hallgatólagosan elismerte, hogy a világ természetes rendjét általunk „törvényeknek" nevezett dolgok irányítják, hiszen állandóan ezek megfordításán fáradozott. Meg kellett idéznie a gonosz szellemet, hogy szembeállítsa a jóval. Ezt abban a tényben is tükröződni látjuk, hogy oly sok okkult praktika hangsúlyozza a természetes rend visszafordítását; emlékezzünk csak a „fekete misére", amelyben a katolikus misét visszafelé kántálták.

Ahhoz, hogy ezek a természetellenes praktikák hatásosak legyenek, a megfelelő lelkiállapotban kellett elvégezni őket. Az újkori tudomány nem olyan jelenségeket keres, amelyek valamilyen módon válaszolnak a kísérletező lelkiállapotára, és nem ismeri el azt a lehetőséget sem, hogy a dolgok természetes menete megváltoztatható. Ilyen eszmének nincs értelme a legújabb kori feltevések keretein belül, mert a természetes rend nem több és nem kevesebb, mint mindazon események összessége, amelyek megtörténhetnek és megtörténnek. A tudományos nézet a lehető legtöbbet igyekszik megmagyarázni egyetlen típusú logikai elvvel. Igyekszik elkerülni azt, ahogyan a varázsló a világot a törvények egyik csoportja által irányított „hétköznapi", mindennapi jelenségekre és ettől elkülönítve egy rendkívüli, okkult világra osztja, mely utóbbi-

ban a törvények és logika más formája érvényes, és amelyről azt hitték, hogy az emberi akarat ereje által befolyásolható és megidézhető.

Társadalmi és vallási előzmények

> Ne csinálj magadnak faragott képet, és semmi hasonlót azokhoz, a melyek fenn az égben, vagy a melyek alant a földön, vagy a melyek a vizekben a föld alatt vannak.
>
> Kiv. 20,4

Az erős központi kormánnyal rendelkező civilizált társadalom kialakulása számos helyen és időben végbement, és közvetett hatást gyakorolt a tudomány fejlődését alátámasztó feltételezésekre. A világegyetemnek mint rendezett államnak az ábrázolása, amelyben a szabályok és előírások az emberek jólétét szolgálják, bizonyára befolyásolja az események ilyetén menetét. Sok tudományos kutatás mozgatórugója az a gyakorlati igény volt, melyet a nagy társadalmak közös szükségletei hívtak életre akár a mezőgazdaság, akár a hajózás, akár a katonai védelem ellátására. Nem annyira nyilvánvaló azonban, hogy az elvontabb érdeklődés szellemét mi szabadította ki a palackból. Még az is elképzelhető, hogy egy külsőleg lapos és sivár kultúra a képzelőerő számára frissítő gyakorlatnak tekintheti a világegyetem eredetével és természetével kapcsolatos elvont kérdések területére tett filozófiai kirándulásokat, mint ahogyan mi egy regény elolvasását vagy egy színházi előadás megtekintését.

Nyugaton a tudományos vállalkozás fejlődése igen sikeresnek látszott egy olyan környezetben, ahol erős volt a legtágabb értelemben vett törvény és rend szerepébe vetett hit. Azonnal adódik két lehetséges alaptípus: erős polgári jogrendszerrel és központi kormánnyal rendelkező államok, valamint azok a kultúrák, amelyeket erős vallásos egyistenhit jellemzett. Az előbbiben lehetővé válik, hogy analógia rajzolódjék ki a természetnek a természeti törvények fennhatósága alatt álló, rendezett működése, valamint a társadalomnak a polgári törvények szerinti, rendezett működése között. Az utóbbi azt a hitet bátorítja, hogy a természetet egy mindenható isteni törvényalkotó rendeletei kormányozzák. A mindkét fenti tulajdonsággal rendelkező kultúra különlegesen előnyös környezet a természeti törvényekbe, a világ ésszerűségébe és rendezett jellegébe vetett szilárd hit kialakulásához, ama szilárd hit kialakulásához, hogy létezik valami, amit érdemes kutatni.

Bármilyen meggyőző is ez a gondolat, úgy látszik, nem ez a válasz. Lényeges felismerni, hogy attól a korai hittől, mely szerint a törvények az általuk irányított dolgok belső jellegéből származnak, fokozatos átalakulás játszódott le a korai egyistenhívő kultúrák szemléletéig, mely szerint a törvényeket egy külső törvényalkotó rendeli a természet fölé. Látjuk majd, hogy a görögöknél ez az átalakulás kéz a kézben halad a teleologikus magyarázatok elvetésével a kauzális alapon állók javára. Ez a fölérendelt törvény gondolata felé való fordulás olyan eszmékkel terhes, amelyek túlmutatnak azon az elképzelésen, hogy a természeti törvények csupán szokásos, megfigyelt eseménysorozatok. Egy, a természet mögött rejlő közös tényezőt hangúlyoz, és megállapítja a természet egyetemességét. S ami még fontosabb, megállapítja a természet valamely elemének változatlanságát az események folyamával szemben. Ha a kövek mozgását irányító törvények minden egyes kő belső tulajdonságaiból erednek, akkor különböző kövek különbözőképp mozoghatnak, és ugyanaz a kő is megváltoztathatja dinamikus tulajdonságait, ahogy kopik-mállik és külseje megváltozik. A természetben nincs állandó tényező, és nem lehetnek változhatatlan törvények. Meg kell ezért vizsgálnunk, hogyan dajkálták a fölérendelt törvények eszméjét a nagy monoteista kultúrák.

Általánosságban kimondható, hogy őseink számára a természeti törvény eszméje különbözött a mai értelmezéstől. Napjaink tudósa szerint a leghasznosabb fajta törvény egy szabálygyűjtemény, többnyire matematikai egyenletekbe foglalva, amely megmondja, hogyan változik valami vagy az idő múlásával, vagy a helyváltoztatással, vagy mindkét változó szerint. A görögök szemében ez mégis olyasvalamit jelentett, ami nem változik: változatlan, statikus, tökéletes harmóniát. Mint látni fogjuk, még mindig gyakorta kimutatható, hogy a térben és időben lejátszódó változásokat leíró bármilyen egyenletrendszer és valamilyen változatlan, harmonikus szimmetria között szoros kapcsolat áll fenn, ám a szóban forgó szimmetriák gyakran rendkívül elvontnak bizonyulnak.

A bibliai nézet rendkívül fontos, hiszen erőteljes befolyást gyakorolt annak az időszaknak a java részében, amelyben a legújabb kori tudomány kialakult. A XX. század elejéig a vezető angol tudósok többsége buzgó keresztény volt, és látni fogjuk, hogy ennek kézzelfogható hatása volt tudományos munkásságukra.

Az Ótestamentum ábrázolása szerint Isten alaktalan semmiből formálta a világot, különleges módon rendezte el, és jól körülírt tiltásokat is tett. Ez jellegzetes hozzáállást vált ki és tükröz is egyúttal a természetes világgal kapcsolatban. A zsidó vallás szertartásai és maga a hit számottevően különbözött az ókori világban másutt szokásos gyakorlattól, és a természetnek

fentebb körvonalazott, korábbi, mágikus szemléletétől. Az ótestamentumi zsidók szerint Isten nem magukban a természet tárgyai*ban* volt jelen, ezért tiltották a bálványokat és a „faragott képek" készítését. A zsidók akkor jártak legközelebb az entheizmushoz, amikor a hegyeket és „magas helyeket" Isten közelségével kötötték össze. Számukra létezett egy külső világ, amely elkülönült a természet mögött álló rendező erőtől, és mindkettő elkülönült az ő szubjektív tapasztalatuktól. A varázslás és a jövendölés tilalma elejét vette annak a hitnek, hogy a természet eseményeit emberi akaraterővel irányítani lehet, és megerősítette a szubjektív emberi elme elválását a természet objektív világától.

A fejezet elején idézett, a „faragott képek" készítését tiltó, megdöbbentő parancsolatnak számos következménye van. Amióta csak elhangzott, a „bálvány" szónak rosszalló értelme van. Ez a rendelés nemcsak a tárgyak istenként való imádását, hanem az egy igaz Isten *ábrázolását* is tiltja. Vallási gyakorlatuknak e korlátozása tartóssá teszi, hogy megelégednek a dolgok *absztrakt* szemléletével, és állandósítja a bizalmatlanságot aziránt, hogy a dolgoknak lehetnek hasznos vagy jelképes ábrázolásai. A vallásról vagy a természetről való elmélkedésben semmilyen idealista nézet kifejlődése előtt nem nyílik tér.

Az Ótestamentum történeteinek zöme a zsidóknak azt a küzdelmét beszéli el, amelyet a maguk és a környező államok közti ilyetén különbségek fenntartásáért folytattak. A profetikus könyvek java része a bálványimádó gyakorlat ördögi következményeire való figyelmeztetés.

A zsidóság természetszemlélete esztétikai és ünnepi volt, nem pedig hidegen elemző vagy beavatkozó. A természetben elsősorban a Teremtő jelét és jelképét látták, nem pedig megoldandó rejtvényt vagy megzabolázandó erőforrást. A vallásos zsidó számára a természet Istenre mutató jelzőoszlop volt, amely örömet, imádatot és áhítatot kelt, nem pedig Isten ábrázolása. Felépítésének néhány vonása Isten jóságának és nagylelkűségének bizonyítéka volt, míg mások haragjáról tanúskodtak. A természet nem valamilyen különálló dolog volt, amit nagyító alatt boncolgatni lehet, mint holmi különleges példányt, s még kevésbé olyasvalami, ami megváltoztatható vagy kiaknázható. Inkább olyasmi volt, amiben benne lehet lenni, és ami teljes mértékben élvezhető. A teremtmények feletti uralom az Édenkertben törvényesíttetett, maga a természet feletti uralom azonban nem. Mi több, bár a természetes világról elismerték, hogy a Teremtő keze munkája, nem vallották, hogy a teremtés műveinek ismerete szükségszerűen Isten mélyebb megértéséhez vezetne. A mély megértést vagy „bölcsességet" az erkölcsi világban kellett keresni, és „nem szélben, földindulásban vagy tűzben" jött el, hanem „egy halk és szelíd hang", Isten

hangja által (1Kir 19,11-12). A zsidóknak nem volt vallásos indítékuk arra, hogy különösebben érdeklődjenek a természeti világ iránt.

A természetnek ez a viszonylag prózai szemlélete éles ellentétben áll a legtöbb pogány történetben és mitológiában foglaltakkal, amennyiben a természeti világot nem szeszélyes istenségnek látja, akit imádni vagy rettegni kell, hanem a Teremtő műalkotásának, amelyet tisztelni, csodálni és kiválasztott sáfárai által művelni, gondozni kell.

A tudomány nem fejlődhetett ki közvetlenül egy ilyen világnézeten belül, amiként jó néhány misztikus elképzelés sem, amelyek másutt megrontották a racionális vizsgálódás terjedését. A természeti istenek a zsidók számára kárhozatos dolgot jelentettek, és e tabunak lényeges következménye, hogy a természet tanulmányozása törvényes. A természet tanulmányozása világi foglalatosság. A Nap csillagászati vizsgálata veszélyes módszertani problémákba ütközik, ha a társadalom a napistent imádja. Az állattenyésztést nehéz összeegyeztetni a szent tehenek tiszteletével. Mindazon vallási tökéletlenségek ellenére, melyeket az Ótestamentum tulajdonít nekik, a zsidók sohasem estek a csillagjóslás csapdájába, ellentétben szinte az összes többi ókori kultúrával. A Teremtés könyvének első fejezete már az elején kimondja, hogy a Nap és a Hold másodlagos teremtmények: „Teremté tehát Isten... a csillagokat" (Ter 1, 16). Könnyen lehet, hogy ezt a részt akkor írták, amikor a zsidók a Babiloni Birodalom elnyomása alatt éltek, és a babiloniaknak a világ teremtését illető nézeteit a Nap és a Hold hatalmáról szóló asztrológiai elképzelések hatották át. *Gilgames* teremtéstörténete, melyről oly gyakran állítják, hogy hatással volt a Teremtés könyvében megfogalmazottakra, Mardukot, a babilóniai napistent úgy írja le, mint aki parancsaival irányítja a csillagokat:

> Székhelyet teremtett az isteneknek.
> Csillagkép-hasonuk gyanánt a Lumasi-csillagokat
> az égre fölszegezte.
> Megmérte az esztendőt,
> felosztá szakaszokra,
> tizenkét hónapja fölé eggyel-egyen
> három csillagot rendelt.
> Megjelölvén az évnek napjait...
>
> (Ford. Rákos Sándor)

Ez a történet azért is érdekes, mert szintén tartalmazza a törvényalkotó istenség fogalmát. Az író magyarázatot kíván a mennybolton megfigyelhető szabályszerűségekre.

Az Ótestamentum számos közvetlen utalást tartalmaz Jahvéra az isteni törvényalkotó szerepében, amint hatalmát gyakorolja a természeti jelenségek

felett: elválasztja a földet a tengertől, elrendeli a napot és az éjszakát, az évszakok váltakozását, mozgatja a szeleket és az árapályt. E tulajdonítások azt mutatják, hogy ismertek voltak olyan, a természetben meglévő, régóta fennálló szabályszerűségek, amelyeket figyelemreméltónak, ésszerűnek és isteni magyarázatra érdemesnek tartottak. Jahve volt minden természeti jelenség szükséges és elégséges magyarázata, aki nem szorult rá más kiegészítő elvek vagy a dolgokban rejlő természetes hajlandóságok segítségére. A csodák elismerése azt jelzi, hogy nem tudták világosan megkülönböztetni, hogy mi „természetes", mi nem. Így őrizték kegyelettel a természet *kívülről elrendelt* ésszerűségébe, megérthetőségébe és állandóságába vetett hitet, amelyből aztán kihajthatott a természeti törvények fogalma.

Miért nem támadt a zsidók körében tudományos érdeklődés ezekben a korai időkben? Fontos tényező lehet, hogy sohasem alakult ki náluk a tengeri hajózás. Így nem volt szükségük arra, hogy tájékozódás céljából az égbolt rendszeres tanulmányozásával töltsék az időt. A hosszan tartó nomád életforma és a szomszédos országokkal való szakadatlan csatározás is akadályozta a technikai haladást. Sem az építészet, sem az ipar fejlődése nem kapott ösztönzést. Az élet a mezőgazdasághoz és a hagyományokhoz kötődött. Szükséges és elégséges a mindennapi kenyérért dolgozni; az élet túl nehéz ahhoz, hogy helyet lelhessen benne az önmagáért folytatott vizsgálódás fényűzése. Azok közül, akiket nem aggasztott a szegénység, csak Salamonról jegyezték fel, hogy mélyebben érdeklődött a természeti világ iránt, az ő indítéka azonban inkább mondható költőinek, mintsem „tudományosnak".

Nyilvánvaló, hogy a csillagjóslással való foglalatosság kétélű dolog. Egyfelől némelyik ókori kultúrát az égbolt tanulmányozására késztette, valamint arra, hogy részletes feljegyzéseket készítsenek arról, amit ott láttak, másfelől azonban mindig ott voltak az értelmezők, akik nem voltak hajlandók a dolgokat új módon szemlélni, mert ez új vallás bevezetésével járt volna együtt. Hosszú idő alatt egy efféle hitrendszer hajlamos bonyolulttá és mesterkéltté válni, minden új megfigyelést megpróbál beilleszteni a meglévő keretek közé, bármilyen rosszul illik is oda, mert a hitrendszer valódi szerepe a társadalmi választóvonal fenntartása azok között, akik tudják, hogyan kell értelmezni az égboltot, és azok között, akik nem. Csak az egyetemes és szabatos matematikai nyelv megteremtődésével válik lehetővé valóban mindenki számára, hogy részt vehessen a tudományban.

A kínai tudomány

> Nem bízhatunk abban, hogy a természet törvényeinek kódexe valaha is felfedhető és elolvasható, mert nincs biztosíték arra, hogy egy még nálunk is racionálisabb, isteni lény egykoron megalkotott egy ilyen, elolvasható kódexet.
>
> Joseph Needham

Azzal érvelni, hogy a természeti istenektől és a csillagjóslástól elhatárolódó monoteista vallásos hit elősegíti a természeti törvényekbe vetett erős hit kifejlődését és a világ tudományos vizsgálatának lehetőségét – egyvalami, de kiderülhet-e, hogy ezen eszmék hiánya gátolja a természeti törvények kialakulását?

Erre a kérdésre nem lehet egyértelmű választ adni. Akad azonban egy érdekes és jól adatolható példa. Úgy látszik, hogy a régi kínaiak számára az egyetlen, legfőbb istenség eszméje idegen volt, s ennek következményeként a természettudomány ebben a kultúrában különös halvaszületés sorsára jutott. A kínaiak számára nem létezett az isteni lény fogalma, aki törvényeket hozott volna arra, mi történjen a természeti világban, akinek rendeletei megsérthetetlen természeti „törvényeket" mondtak volna ki, és aki jóváhagyta volna a tudományos vállalkozást. Bár kifinomult technikai eredményeket értek el a rakéták és a nyomtatás terén, és hajóikon elterjedten használták a mágneses iránytűt, ezek a találmányok nem buzdították őket a természet szabályszerűségeinek vagy a földgolyó domborzatának felderítésére. Bevezetésük nem ösztönözte forradalmi jellegű tudományos változások időszakainak beköszöntét és nem tágította a szellemi látóhatárt, amint ez a nyugati társadalom hasonló időszakában történt.

A kínai gondolkodás középponti eszméje a legrégibb időktől kezdve napjainkig alighanem a rend spontán kialakulása a világban. Ez az elképzelés a természeti világ jelenségeinek, például a virágzásnak vagy a rovarkolóniák tervszerűen szervezett viselkedésének megfigyeléséből származhatott. Az említett példákban a sok különálló rész között külső, emberi beavatkozás nélkül titokzatos harmónia kél. Másfelől gyökerezhet a kis paraszti közösségeken belül fokozatosan kialakuló társadalmi rendben is, melynek tagjai úgy látták, hogy körükben „természetesen" fejlődik ki a megszilárdult, szervezett életforma, méghozzá a külső, központi kormány által hozott szabályok nélkül. A szabályok tárgyalás és kompromisszum révén alakultak ki, nem zsarnoki rendeletre.

A kínaiak között két uralkodó gondolkodási és viselkedési rendszer volt őshonos. A konfucianizmus az i. e. VI. században jelentkezett, részben a vége-

láthatatlan folytonos polgárháborúk kiváltotta pusztító társadalmi zűrzavarra való visszahatásként. Alapítójának, Kung Fu-cénak (latinos írásmóddal: Konfuciusnak) követői elsősorban a kifogástalan és igazságos társas viselkedés fontosságát hangsúlyozták, azzal az ösztönös etikettel és szokással együtt, amely a társadalom kedvező irányú rendeződéséhez vezet. Későbbi ellenfeleiket, a taoistákat – a konfucianizmus híveivel szöges ellentétben – mindenekelőtt a természetben mutatkozó rend érdekelte, és főként a természeti világ egységét és annak a konfuciánusok által oly sokra tartott emberi viselkedési előírásoktól való teljes függetlenségét hangsúlyozták.

A konfucianizmus végül is államvallás lett, és továbbfejlődése során a liberalizmus paternalisztikus formájává vált. Olyan világnézet létrehozásáért volt felelős, amely nem keresett logikai elemzéssel vagy rendszeres megfigyelések útján szabályokat a természet viselkedésében, hanem ehelyett a társas emberi tevékenységből kibomló harmonikus társadalmi szokásokra tekintett analógiaképpen. A szokásokat pedig nem lehet megjósolni. Spontán és ösztönös vetületeik csak akkor alakulnak ki, ha az ember mindennel és mindenkivel megfelelőképpen együttműködik. Egyszóval: túlontúl bonyolultak ahhoz, hogy a gyakorlatban előrejelezhetők legyenek.

A liberális konfuciánus eszményképet, mely szerint a társadalomnak jó és harmonikus szokások által, spontán módon kellene elrendeződnie, *li*-nek nevezték. Ellentéte volt ez a kortárs legalista filozófiának, mely szerint a társadalmat valamely legfelsőbb uralkodó vagy bíró tényleges jogi parancsai, azaz *fa* útján kell kormányozni, nem pedig kevésbé pontos, mindenki által ösztönösen osztott, természetes megkötésekkel, amelyeket ma „természetes igazságosság"-nak neveznénk – ez annak az érzésnek legkisebb közös nevezője, hogy mi helyes valamely szilárd és egynemű társadalom legtöbb tagja szerint.

A konfuciánusok szerint a polgári uralkodó szerepe elsősorban az, hogy a többieknek makulátlan, követendő példát állítson. A spontán módon, emberi kölcsönhatások és közmegegyezés útján elért rendet sokkal kívánatosabbnak és emelkedettebbnek tartották, mint azt, amelyet valamilyen külső parancs ráerőltetése hívott életre. A tételes írott jognak nem volt akkora becsülete, mint a nyugati kultúrákban. Ha úgy találták, hogy egy *fa*-rendelet ellentétben áll azzal, amit a társadalom *li*-nek tart, akkor az előbbit tekintették nemkívánatosnak.*

*Hadd jegyezzem meg, hogy az ókori Kína joggyakorlatáról Robert Van Guliknak az ötvenes években írott, híres *Di bíró* történeteiből nyerhetünk a legélvezetesebb módon benyomást. Egy konfuciánus bíró életútját követhetjük nyomon a VI. századbeli Kínában, helybeli elöljárónak történt első kinevezésétől egészen főbíróként és a pestis sújtotta Pekingben császári régensként szerzett tapasztalataiig. Van Gulik

A *li* az élet minden területén működött. A *li* volt az oka a Hold és a csillagok mozgásának, az emberi kapcsolatokban az önmérséklet sikeres gyakorlásának, a gazdagok és szegények közti társadalmi különbségnek. „Minden elvek legnagyobbika" volt tehát. Mindezeken a területeken azt, amit nálunk Nyugaton „természeti törvény"-nek neveznek, úgy tekintették, mint ami fokozatosan, de teljesen spontánul alakul és marad fenn, úgy tehát, mint a minden és mindenki kölcsönös javára kialakult szilárd és rendezett viselkedés megnyilvánulását.

A taoista hagyomány ellenezte a természet rendjének keresését a társas viselkedésben. Ez a hagyomány a nomád varázslók és tanítványaik hatására terjedt el. Más életfilozófiákra adott válaszként a taoisták visszavonultak, és remeteként éltek a társadalom közegén kívül. Abban hittek, hogy csak a természettel eggyé válva lehet megérteni a benne uralkodó rendet. Az emberre és sajátos szokásaira nem volt szükség a természettel való egybeolvadás e keresésében. A rend, amelyet kerestek, a Tao (az „Út") nem tűrte a pontos meghatározást; meghaladta az ember értelmi képességeit, és az ellentétek titokzatos összjátékának egyensúlyaként valósult meg. A hangsúly itt is a rend spontán kialakulására esett, ami a természet összes alkotórészének holisztikus kölcsönhatásán keresztül valósult meg. Ez a holisztikus nézet a fizikai valósággal bíró külvilág határozott fogalmát is tagadja, mert a természet harmóniájába oly módon vagyunk belerögzítve, ami az egész rendje szempontjából lényeges. Ha a természet tanulmányozásába kezdünk, ez az önmagunkra vonatkoztatás (önreferencia) problémájához vezet. A törvények a dolgok mélyén rejlenek, nem kívülről rendeltetnek el.

A taoista hagyomány mágikus háttere „kísérleti" gyakorlatra adott indítékot, míg a konfuciánus tudós arisztokrata volt, aki lenézte a kétkezi munkát és mindent, ami rokonságban állt a világ kísérleti vizsgálatával. Technikai érzékenységük ellenére a taoista filozófusok sohasem tettek olyan kijelentéseket, amelyeket természeti törvénynek nevezhetnénk. Nem bíztak az ész ama képességében, hogy feltárhatja a világegyetemet, amiként egy teremtett,

---

holland diplomata volt, egyben kiváló orientalista, aki e detektívhistóriáit az ókori Kínában valóban megtörtént esetekre alapozta, melyeket mesélő művészetével megfelelő módon kiszínezett, ragaszkodva a hagyományos kínai irodalmi stílushoz (bár ahhoz a szokáshoz, hogy a „Ki a tettes?" kérdésre a választ nem a történet végén, hanem már az elején megadja, szerencsére nem), és az ókori Kína mindennapi életét a maga teljességében újraalkotva tárja az olvasó elé. E történeteket számos orientalisztikai kurzus használja háttérolvasmányként, szórakoztató és pontos bevezetésként a korabeli Kína mindennapi életének légkörébe, és a legjobbak közül néhány nemrégiben egy erre a célra szánt különleges kiadásban jelent meg (University of Chicago Press).

feltárható rend létezésében sem, és végső soron nem hittek a természet érthetőségében. Liberális nézetük, mely szerint a Tao nem tud kényszerítő hatást gyakorolni a természetre, és panteisztikus naturalizmusuk szöges ellentétben állt a világegyetemet irányító Isten vagy istenek egész fogalomrendszerével.

E filozófiai hagyományok szokatlan folyományai különösen erős hangsúlyt kapnak Joseph Needhamnek az ókori kínai tudomány és technika történetének területén végzett széles körű kutatásaiban. Úgy látszik, hogy a kínai világnézet elfojtotta a tudomány fejlődését e nagyszerű kultúrán belül. A harmonikus szokások kialakulása mind a társadalom, mind a természet birodalmában az egész javáért munkálkodó tagok belső természetéből, nem pedig valamilyen kívülálló legfelsőbb lény rendeleteiből fakadt. A polgári törvényalkotás és a természet megengedett működésében elrendelt megszorítások párhuzamának gondolata nem fejlődött ki, és nem alakult ki a legfelsőbb törvényalkotóba vagy mindenható teremtőbe vetett hit hagyománya sem. Minden rendelkezett azzal a képességgel, hogy létrehozza önmagát, így nem ösztökélt lélektani vágy a személyes teremtő bevezetésére.

Így azután a *fa* nyugatiasabb hagyománya helyett a *li* hangsúlyozása feltételezhetően elnyomta azt a nézetet, mely szerint a természet Isten által lefektetett, meghatározott törvényeket követ, és a régi kínaiaknak így nem volt miért hinniük a természetben rejlő ésszerűségben, ami pedig részletes megfigyelés és törvényekbe foglalás útján felfedhető és megérthető. A világegyetemet túlontúl bonyolultnak hitték ahhoz, hogy egy ilyen vállalkozást akár csak átgondoljanak. Ez a holisztikus nézet azt az eszmét is tagadja, mely szerint a természetet kicsiben, részenként tanulmányozva, eljuthatunk az egész megértéséhez. Az egész természet egy volt, minden egyes része játszotta a maga saját szerepét egy óriási, önmagán belül ellentmondásmentes mintázatban, mégis mindegyik csak a saját belső irányítójének hatását követte – inkább hangyák, mintsem emberek társadalma ez. A rend eszméje sohasem tartalmazott semmilyen utalást arra, hogy elkerülhetetlenül léteznie kellene korlátozó törvényeknek és egy azokat elrendelő törvényalkotónak. A korai technikai fölény ellenére az ókori Kínában a tudományos magatartás elhalványodott és beteljesületlenül elhalt, mert sohasem született meg a „természeti törvények" fogalma.

A görögök

A világ haladása szempontjából a görögöket az teszi igazán fontossá, hogy felfedezték azt a szinte hihetetlen titkot, hogy a spekulatív ész maga is szabályos módszerekkel végzett vizsgálat tárgya lehet.

A. N. Whitehead

Gyakran elhangzik, hogy a legújabb kori civilizáció mindent a régi görögöknek köszönhet: hogy a mai matematika, tudomány és filozófia egyaránt néhány tehetséges egyén erőfeszítéseiben gyökerezik, akik körülbelül kétezer évvel ezelőtt a Földközi-tenger keleti partvidékének kicsiny szakaszán éltek és dolgoztak. Ám minél közelebbről vizsgáljuk meg ezt az elgondolást, annál kevesebb igazságot találunk benne. Bár nagy képzelőerejű, zseniális filozófusaik és matematikusaik voltak, mégsem sikerült jelentékeny mennyiségű tudományos és technikai tudást felhalmozniuk. Karnyújtásnyira voltak a természeti törvények felfedezésétől, de sohasem érték el ezt. Minden általánosításhoz hasonlóan ez utóbbi alól is van néhány kivétel, ám meglepően kevés és egymástól távol eső, és amikor az Arisztotelész utáni időszakban valóban megjelenik egy Arkhimédész vagy Ptolemaiosz kiemelkedő géniusza, ez nem vezet el az emberi gondolkodás forradalmához, mint később Newton fellépése. A számottevő haladás a csillagászatban, geometriában, logikában és filozófiában következik be. Érdekfeszítő kérdés, hogy vajon a szilárd kormányzattal és magasan fejlett polgári jogrendszerekkel rendelkező görög kultúra intellektuális légköre miért nem vezetett a természeti törvények nagy kódexének felfedezéséhez.

Első pillantásra úgy tetszik, hogy a görög gondolkodás számos irányzata egyenesen a tudományos forradalom bevezetése felé vezetett. A mítoszteremtő gondolkodás béklyói folyamatosan pusztultak, helyüket az ésszerű gondolkodás hangsúlyozása vette át, amelyben felismerhető az ok és okozat viszonyának méltánylása. Nem hitték többé, hogy a természet önkényes vagy ésszerűtlen módon cselekszik, és hittek a világ megérthetőségében és ésszerűségében. Tanulmányozásra méltó tárgy volt. A görög kultúra további megkülönböztető jegye az a tény volt, hogy a természet kutatásának vállalkozása most először nem egy papokból álló kisebbség kizárólagos előjoga volt, akik aztán továbbadták értelmezésüket a köznapi embereknek. A tudomány világivá vált: laikus tevékenységgé, amelyet bárki űzhetett, aki elég szerencsés volt, és szabad embernek, nem pedig rabszolgának született.

Számos görög filozófiai iskolában az „abszolút igazság" keresésének nyomatékos hangsúlyozása először tesz tanúságot rendszeres vágyról aziránt, hogy

kikutassák és megértsék az igazságot önmagáért, mindenféle katonai vagy gyakorlati indíték, vagy óriási mennyiségű tény felhalmozására irányuló szerzési vágy nélkül. Hát nem ez-é a mag, melyből a tudás fája sarjad?

Több oka is van annak, hogy a görögöknek nem sikerült termékeny elképzelést kialakítaniuk a természeti törvényekről, elindítaniuk a rendszeres kutatómunkát, és ezek bonyolult módon összefüggenek egymással. Mégis különválaszthatunk néhány uralkodó irányzatot a görög gondolkodásból és gyakorlatból, melyek – úgy látszik – együttesen olyan akadályt emeltek, amelyen a természeti világról való gondolkodásuk nem tudott túljutni.

Kezdjük néhány általános irányzattal, amelyek abban a kb. i. e. 600-tól Arisztotelész i. e. 322-ben bekövetkezett haláláig terjedő időszakban hatottak, amikor minden lényeges filozófiai fejlemény lejátszódott. Később majd válogathatunk az egyes befolyásos filozófiai iskolák sajátos előítéletei között. A legszembetűnőbb általános vonás az, hogy amit mi tudománynak nevezünk, mennyire alterület csupán a filozófián belül. Valóban, nem is különböztették meg egymástól azt, amit ma „tudománynak", illetve „filozófiának" nevezünk: csak a dolgok természete iránti általános vizsgálódás létezett, egyfajta természetfilozófia. Arisztotelész előtt ez a vizsgálódás nem is szerveződött meg szakterületek szerint. A fő megkülönböztetés a változást és bonyolultságot mutató természeti tárgyak és tünemények sorát választotta el a matematikai jellegű statikus, abszolút igazságoktól, melyeket a geometria foglalt össze. A gondolkodók csoportjait valamelyik filozófiai iskolához fűződő kapcsolatuk, a természeti jelenségekről formált gondolataik kapcsolták össze, melyeket az ott uralkodó filozófiai gondolatmenet szabott meg. Olyan ez, mintha ma az egyetemek fizikatanszékeit különböző meggyőződésű filozófusok vezetnék. Az egyik egyetemen az idealisták uralkodnának, olyan kollégákat és látogatókat vonzva, akik ezt az irányvonalat követik, míg a másik egyetemen mindent az operacionalisták rendelkezéseivel szigorú összhangban tennének. A tudomány a legrosszabb értelemben vett természetfilozófiává válna (ezzel nem állítjuk azt, hogy napjaink tudományos munkájában ne érvényesülnének helyi hatások, ne léteznének „központok", ahol egy-egy iskola kutatja a szóban forgó elmélet következményeit, vagy ahol a vezetőjük által megszabott sajátos stílusban dolgoznak – annyit akarunk csak mondani, hogy ezeket a jelenkori tudományos iskolákat nem az emberi vizsgálódás teljes választékára vonatkozó filozófiai nézetek alakítják ki).

Amint korábban említettük, a természeti világ kutatása fölé boruló filozófiai védőernyő kezdetben létfontosságú volt, ha a problémákat és a jelenségeket racionális módon akarták megvitatni, visszatekintve azonban megállapítható, hogy a korai filozófusok túlságosan nagyratörő célokat tűztek maguk elé. A

görög filozófiai iskolák a teljes és végső igazságot akarták felderíteni a világról. Mindig az általánosra, nem pedig a sajátosra összpontosítottak. E törekvésnek volt egy fölöttébb sajnálatos hatása: miután azzal kezdték, hogy *mindennek* a természetéről alkottak elméleteket, roppant nehéz volt az egyes dolgokról szóló részletes elméletek alkotása felé továbbhaladniuk. Egy elmélet, amely mindenről tud valamit mondani, éppen nagyfokú általánossága miatt túl határozatlan és híg ahhoz, hogy túlságosan sokat mondhasson bárminek a részleteiről. A tudomány csak a reneszánsz korában indult rohamos fejlődésnek, amikor korlátozta célkitűzéseit, és a sajátos vizsgálatát az általános megértéséhez szükséges előfeltételként kezdte kezelni.

Jóllehet ma a tudósok véleménye különbözhet a világegyetemben található különböző dolgok magyarázatát illetően, a tanulmányozandó szakterületek tekintetében egyetértenek. A görögök számára azonban a „természet" szónak számos különböző jelentése volt, és filozófusaik jobban szerettek az eszme jelentéseiről vitázni, mint megfigyelni, mi is történik a világban.

A dolgok végső természetének kutatásában volt még egy másik sajnálatos hangsúly is, amely a korai materialista filozófusok munkáját uralta. Bár a görög filozófusok közül egyedül ők hitték, hogy a dolgok érzékszerveink tanúsága alapján megérthetők, és nem kell a valóságnak és az igazságnak valamilyen magasabb rendű formájára támaszkodni, amely érzékszerveink számára nem észlelhető, mégis azok a dolgok, amelyekre ezt a logikát alkalmazták – afféle kérdések, mint minden dolgok eredete, az élet eredete és hasonlók –, teljesen kívül estek a megfigyelés lehetőségén. Materialista redukcionizmusuk miatt azt a nézetet fogadták el, hogy ha minden levegőből és vízből épül fel, akkor az emberi elmétől egészen a kalapácsig mindennek a tulajdonságai tökéletesen megmagyarázhatók a levegő és a víz tulajdonságainak ismerete alapján. Később mind a platóni, mind az arisztotelészi nézőpont erős visszahatás volt ezekre az elképzelésekre: azt tartották, hogy a végső valóság teljesen anyagtalan valami, amelyet csak a tiszta gondolkodás ragadhat meg.

A filozófiai hozzáállás túlsúlya egy másik, felszínesen tekintve üdvözlendő vonást is eredményezett, ami azonban csapdának bizonyult. A formális logikára mint a természetről való mindennemű fejtegetésben követendő paradigmára fektetett hangsúly, különösen Arisztotelésznél, terméketlenséget teremt. A matematikai érvelésben, amikor is szokatlan kapcsolatokat keresünk típusok vagy számok között, netán összefüggéseket háromszögek oldalainak hossza között, a formális logika csodákra képes. Lehetővé teszi, hogy mély értelmű kölcsönös összefüggések hálózatát építsük ki már ismert dolgok között. Már definiált dolgokat helyez egymás mellé és kapcsol össze. A logika azonban önmagában képtelen arra, hogy az entitások új típusainak létezését felfedje,

kísérletekben vagy megfigyelésekben pedig természetesen nem sok hasznát venni. A geometria iránti tisztelet azt a hitet kelti, hogy a világ legfontosabb tulajdonságai statikusak, és meggátolja, hogy a világ szerkezetének dinamikus vetületeire összpontosítsunk. Megerősíti azt a görög állásfoglalást, hogy az a fontos: valójában mik a dolgok, nem pedig az, hogyan viselkednek vagy viszonyulnak más dolgokhoz. Az a tudós, aki csak „magától értetődő" elvekből kiinduló logikai érvelést alkalmaz, hamarosan zsákutcában találja magát, miként a vak tájképfestő. Ahhoz, hogy a természetes világ működéséről szerzett tudásunk növekedjék, megalkuvónak kell lennünk. Látjuk majd egy későbbi fejezetben, hogy a tudomány jelentős és titokzatos módon lekötelezettje a matematikának, ám a görögöket éppen a matematika kérlelhetetlen logikája iránti tiszteletük gátolta bizonyos mértékig.

A görög matematika szégyentelenül tiszta matematika volt. Bevezette az „axiómák" használatát a magától értetődőnek tekintett igazságok leírására, amelyeket nem kell bizonyítani. Felismerte, hogy az analízisnek kezdete kell hogy legyen. S az alkalmazott matematikai gondolkodástól való idegenkedés olyan szociológiai előítélettel párosult, amely visszatekintve a tudományos fejlődés egyik fő akadályának látszik a görög kultúrán belül.

A görögök lenézték a kétkezi munkát. Valódi arisztokraták voltak, és gazdaságuk kulcseleme a rabszolgatartás volt. Tudunk olyan közösségekről, amelyekben minden két szabad emberre több mint egy rabszolga jutott. A társadalmon belüli egyenlőtlenségek mély szakadékot nyitottak a szellemi és a gyakorlati világ között. Az eredmény egy technikai haladás nélküli társadalom volt. Vannak, akik úgy vélekednek, hogy egy társadalomban a rabszolgaság megszünteti a munkamegtakarító eszközök keresésének indítékát, és ez elegendő magyarázat arra, miért nem történt rendszeres technikai haladás a görögöknél. Bár ez az érvelés bizonyos társadalmakra igaz lehet, nem hangzik túlságosan meggyőzően. Hiszen nem alkalmaztak-e Egyiptomban és az ókori világ más nagy birodalmaiban rabszolgamunkát, és nem használták-e azt gyümölcsözően technikai terveik megvalósítására? Valószínűbb, hogy a rabszolga-munkaerő megléte óriási technikai vállalkozásokra sarkall, mint például az egyiptomi piramisok építése. A görögökre a rabszolgamunka közvetett és lélektani hatást gyakorolt. A kétkezi munkát a rabszolgák végezték. Világias dolog volt. Gépeket szerkeszteni, kísérleteket végezni az arisztokrata méltóságán aluli dolog volt, azoknak való tevékenység, akik nem tudnak gondolkozni. Az ilyen fennkölt előítéletek szerencsétlen következményekkel járnak. Az igazság keresése semmi másért, mint a tudás kedvéért: csodálatra méltó, de ha ahhoz a nézethez vezet, hogy az igazság más célból való keresése alacsonyabb rendű, akkor csapdává válik. Ez a beállítottság azt eredményezte,

hogy a természet iránti mindennemű érdeklődést az elmélet uralt. Nem voltak kísérletek. A természet tanulmányozása nagyrészt néző-sport volt. Szó szerint az „elméleti ember" tevékenysége, aki az ókori olimpiákon a versenyzők tevékenységét szemlélve üldögélt. Őt küldték Delphoiba, hogy hozza el a jós kinyilatkoztatását. Nem vett részt a dolgokban, és nem vadászott a tényekre.

A rabszolgamunka elfogadása közvetlen gyakorlati következménnyel jár az alkalmazott tudományok fejlődésére nézve. Bár helyesen kiaknázva a rabszolgamunka meggyorsíthatja a nagyszabású építészeti vagy mérnöki vállalkozásokat, hátráltatja egy független, képzett mesteremberekből álló, széles réteg kialakulását a társadalmon belül. A mesterek műhelyei és arra való törekvésük, hogy mind nagyobb és jobb műtárgyakat meg eszközöket építsenek a természet átalakítására – ez ösztönözte az alkalmazott tudományok gyakorlását a reneszánsz korában.

A kísérletezés iránti korai görög ellenszenv mögött alighanem több rejlett, mint eltorzult értékrend. Bár a görög gondolkodók nem folyamodtak természeti istenekhez a maguk körül tapasztalt jelenségek magyarázatáért, azért megtartottak bizonyos, a korábbi mitologikus hiedelmekből kultúrájukba beépült gátlásokat. A természet nem volt teljes mértékben világi, és a tanulás érdekében való befolyásolása különös gondolatnak tűnt volna föl. Élő szervezet volt, nem mechanizmus. Feltétlenül értsük meg a világot, de ne próbáljuk világias célokból megváltoztatni. Valószínűleg nem véletlen, hogy a görögök a csillagászatban érték el a legnagyobb haladást, ahol a természet befolyásolása lehetetlen. Emellett a görög istenek – ez az indulatos és szeszélyes társaság – nem bátorították azt az eszmét, mely szerint a természet működését egyetemes és isteni rendelet irányítja. Sok isten létezett, mindegyiknek megvolt a saját jogköre, és világukban a döntéseket viták, tárgyalások és engedmények útján, nem pedig mindenható rendelkezésekkel hozták.

A világról alkotott legelső eszméik mitológiai alapjának talán még egy fontos következménye volt tudományos módszerükre nézve: a kísérletezés a háttérbe szorult. A görögök számos fizikai elmélete és kozmológiája olyan, mintha a korai mítoszok racionális átiratát olvasnánk. Kivétel nélkül arról szólnak ezek a történetek és magyarázatok, ami a homályos és messzi *múltban* történt, s nem hipotézisek és előrejelzések a jövőről. Mindössze azt a követelményt támasztották elméleteikkel szemben, hogy a belső ellentmondásoktól mentesek legyenek. A deduktív éleselméjűség gyakorlatai ezek; a jövőbeli megfigyelések következményének kérdése sohasem merült fel.

Számos nyilvánvaló, tényleges haszna volt annak, hogy iskolák és akadémiák alapultak a vita és a vizsgálódás elősegítésére. Először is ezek kritikus szellemi pályatársakkal szolgáltak a kiemelkedő gondolkodóknak – Koperni-

kusz vagy Galilei nem élvezhette ennek előnyeit. A feltételezések és cáfolatok kötetlen megbeszélése a legkülönbözőbb meggyőződésű tudóstársakkal a legújabb kori kutatómunka alapjává vált. A látszat ellenére a mai nagy tudományos konferenciák legfontosabb része nem a hivatalos előadások menetrendje, amely köré a konferencia épül, még csak nem is emez előadások szövege, amelyet könyv formájában is kiadnak, hanem az a számtalan kötetlen beszélgetés és vita, amelyre a konferencia izgalmas légkörében bőséges alkalom nyílik. A legtöbb szállodák előcsarnokában játszódik le, vonaton vagy kocsiban, útban a konferencia felé, az ebéd- és vacsoraszünetekben vagy kis, összeverődött csoportokban kávézás közben.

Mindazonáltal láttuk, hogy az egyes görög gondolkodói iskolák testületszerű viselkedésének káros hatása is volt, mert a szóban forgó filozófiai rendszer iránti hűségük alapvető szerepet játszott. Egy másik káros mellékhatás, amely legjobban a korai, Szókratész előtti filozófusoknál, mint pl. Püthagorász követőinél figyelhető meg, a titoktartás iránti különös vágy volt. A filozófusok titkos szervezetekbe tömörültek, úgy, mint manapság a szabadkőművesek.

Körülbelül i. e. 531-ben a számoszi Püthagorász szerzetesi testvériséget alapított, és az iskola filozófiai hiedelmei szabályozták tagjai életmódját a mindennapokban is. Ma ezt kultikus szektának neveznénk. Valóban, a mindennapi életre temérdek szabály és rendelkezés vonatkozott, s ezek emlékeztetnek a Mózes öt könyvében található zsidó szertartási törvényekre. Ez a rend körülbelül kétszáz évig maradt fenn, és még Platón és Arisztotelész idejében is létezett. Míg az első görög filozófusokat Milétoszban pusztán a kíváncsiság vezérelte a levegőről, földről és vízről való tűnődésükben, Püthagorász követőinek ez misztikus kötelességük volt. A világ isteni harmóniáját keresték, hogy eggyé válhassanak vele. Püthagorász követői a görögök között elsőként nevezték a világot „kozmosz"-nak, így hangsúlyozva azt a harmonikus rendet, amelyet számukra megtestesített. Hittek a reinkarnációban és a lélekvándorlásban, valamint abban, hogy a következő életben társadalmi helyzetük felemelkedése úgy biztosítható, ha ebben az életben mereven ragaszkodnak viselkedési szabályzatukhoz. Végül a születés és a halál ciklusait megtörheti az istenekkel való örök eggyéválás. A hétköznapi élet minden területén a szemlélődés volt a legmagasabb eszmény. Püthagorász például az olimpiai játékokban fontosabbnak tekintette volna a nézőket, mint a versenyzőket. A nézők ugyanis nem anyagi nyereségért jönnek, és nem keresnek hatalmat vagy rangot sem. Püthagorász „nézése" természetesen nemcsak semmittevő bámészkodás volt, hanem a műértő tevékeny, gondos értékelése, aki szépséget és geometriai harmóniát keres egy szoborban vagy építészeti alkotásban. S ebben a szem mellett az elme is részt vett.

Püthagorász követőinek nagy felfedezései a matematika és a zenei harmónia területén közismertek, kutatásaik misztikus indítéka azonban néhány különös következménnyel járt. Az irracionális számok felfedezése a geometriában alapjaiban rázta meg hitüket, és ezért egy ideig szigorú titokként őrizték. Számmisztikai hiedelmekkel átszőtt vallásuk azt parancsolta, hogy a világban tett megfigyeléseknek összhangban kell lenniük a harmóniáról vallott eszméikkel: a megfigyelés nem szolgálhatott alapvető útmutatásul annak megállapításához, milyen is a világ. Arisztotelész például ezt írta róluk:

> Úgy értem ezt, hogy például mivel szerintük a tízes a tökéletes szám, amely a számok egész természetét magában foglalja, ezért az égi bolygók számát is tíznek mondották. Minthogy azonban csak kilenc látható, tizediknek megtették az ellenlábas földet.
>
> (Ford. Halasy-Nagy József)

Felszínesen tekintve az a püthagorászi hit, mely szerint minden „számokból van", nem látszik számottevően különbözőnek attól a jelenkori elgondolástól, hogy a világegyetemet legjobban matematikai mennyiségekkel írhatjuk le. Ám lényeges különbség van aközött, hogy az ember elismeri – mint mi tesszük –, hogy a természet működése leírható matematikai törvényekkel, és aközött, hogy azt hiszi – mint Püthagorász tanítványai –, hogy a számokban magukban van valami isteni. Mi azt találtuk termékeny gondolatnak, hogy a dolgok *között* számszerű összefüggések vannak, de magukat a számokat nem ruháztuk fel semmilyen mágikus vagy szent ranggal, mint Püthagorász követői tették. Ami ma számunkra olyan különösnek tetszik, az az, hogy Püthagorász nem értette volna, hogyan lehet bármilyen megkülönböztetést tenni matematikai eszméi és a halhatatlanságról meg a kozmosszal való eggyé válásról alkotott misztikus hite között. Ilyen áthidalhatatlan a szakadék múlt és jelen között. Ez a misztikus irányzat mégis rendületlenül fennmaradt a természetfilozófusok egy-egy csoportjában, egészen Galilei idejéig. A számmisztika a természet matematizálására törekvő egyik, végső soron sikertelen út volt. Míg a tudomány végül is azáltal gyarapodott, hogy matematikai módszerrel azonosította az okokat az okozatokkal, Püthagorász hermetista* utódai a természet belső jelentését keresték matematikai szimbólumok segítségével, de a természetet

*Az úgynevezett „hermetikus hagyomány" az első három században írt és a hagyomány szerint Hermész Triszmegisztosz egyiptomi istennek tulajdonított tizenöt anonim értekezésből ered. Misztikus és vallásos írások keverékei ezek, amelyek görög, zsidó és perzsa filozófiai elemeket is tartalmaznak, és jelentős hatást gyakoroltak egyes reneszánsz filozófusokra.

kódolt üzenetnek tekintették, amelyet intuíció útján megfejthetnek, nem pedig kívülről fölérendelt, kísérleti úton egyre nagyobb pontossággal meghatározható törvények irányította rendszernek. Elképzelésüket, mely szerint a természet egy megfejtésre és elolvasásra váró könyv, végül is a világnak mint gépnek az ábrázolása váltotta fel, ahol minden eseménynek oka és hatása van, nem pedig jelentése.

Végső összegezésben a püthagorászi megközelítés előremutató alkotóelemeit – a matematika alkalmazását a világ leírására és az események okának kutatását – misztikus indítékaik semmissé tették. Az iskola kimúlásáért nem belső ellentmondások voltak felelősek, hanem az utána következő, uralkodó platóni filozófiai iskola jellege, és az a mód, ahogy ez az irányzat továbbfejlesztette a látható világegyetemről való korábbi, püthagorászi gondolkodást.

Platón

> Mert a szépség tulajdonképp oly feltevéseknek a sora, amelyeknek a csúnyaság megszűkíti, sőt elzárja az útját, azt az utat, amelyet már megnyílni láttunk az ismeretlenre.
>
> Marcel Proust
> (Ford. Gyergyai Albert)

Platón tehetős athéni arisztokrata családban született, kb. i. e. 428-ban. Hozzájárulása a filozófiához és az irodalomhoz felmérhetetlen, ám most csak munkásságának egyetlen, kulcsfontosságú részére kívánunk összpontosítani, amely összefügg a természeti törvények keresésével. Bár Platón örökölte Püthagorász tanítványaitól az aritmetikának és geometriának az emberi vizsgálódásban játszott szerepe iránti tiszteletet, legalapvetőbb indítékát nem nevezhetnénk tudományosnak, és nem is pusztán a természetfilozófusok korábbi nemzedékei által felvetett problémákat igyekezett megoldani. Érdeklődésének fő területe az erkölcsi, társadalmi és politikai kérdések köre volt.

Platón megkülönböztette egymástól az érzékszerveink által tapasztalt látható világot és az elméleti világot, amelyet tiszta „formák" vagy „ideák" népesítenek be – tökéletes tervrajzai voltak ezek mindannak, aminek a világban látott és tapasztalt dolgok csak tökéletlen másolatai. Véleménye szerint a világegyetemben rejlő valódi igazságot csak a tökéletes formák e világában lehet meglelni, nem az érzékszerveinkkel megfigyelt természeti jelenségekben, sőt még a felfedezett matematikai mennyiségekben sem. Az anyag csak másodlagos szerepet játszott: a formák megvalósítását. Ezeket a formákat

örökkévalónak tartották. Valamilyen módon még akkor is fenn kell maradniuk, ha a fizikai világegyetem a benne lévő megfigyelőkkel együtt eltűnne. Az a gondolat, hogy a végső valóság csak láthatatlan dolgokban található meg, burkoltan jelen volt a korábbi püthagoreus gondolkodóknál is, csakúgy, mint Hérakleitosz, Parmenidész és Anaxagorász töredékeiben. Egyfajta kettősséget vezetett be a valódi világ és egy látszólagos világ között. A tökéletes formák változatlan világáról csak racionális tudás szerezhető, tapasztalataink állandóan változó, de tökéletlen világáról azonban empirikus tudást is szerezhetünk. Platón filozófiájának nagy része e két vonalat próbálta összefűzni. A realista vonalat Arisztotelész követte, és gyakorlati tudománnyá fejlesztette. A Platóntól származó realizmus és idealizmus egy napon újra összeolvad majd az arisztotelészi empirizmussal, hogy létrehozza a középkor világnézetét, ám később újra szétválnak.

Platón megtartotta a püthagoreusok furcsa elképzeléseit a reinkarnációról, mert úgy vélte, hogy érzékeink e formákat először egy múltbeli létben érzékelték, ahol a lelket nem akadályozták a test tökéletlenségei. Ez az előzetes ismeret tesz minket képessé a jelen megtestesülésben látott tökéletes formák felismerésére, a rájuk való visszaemlékezésre.

A fentiek alapján egyesek úgy gondolják, hogy a platóni iskola a tudomány szempontjából valóságos szerencsétlenség. Teljesen elválasztotta egymástól az elméletet és a megfigyelést. A munkás nem találhatott fel új szerkezetet, mert meg kellett várnia, hogy az istenek megteremtsék azt a tökéletes formát, amelyen az majd alapulni fog. A múlt technikai felfedezőivel közölték, hogy csak az istenek tervrajzait valósították meg! Az új felfedezésekkel valamiféle isteni kezdeményezésre kellett várni, mintha az isteneknek először fel kellene oldaniuk az eszmékre érvényes titkossági tilalmat, mielőtt az emberek hozzájuthatnának. Az az eszme, hogy bizonyos típusú természetfilozófiát anyagi nyereség vagy munkamegtakarítás céljából űzzenek, elfogadhatatlan lett volna Platón követői számára. A technika és a kísérlet nemcsak hogy irtózat tárgya volt a kétkezi munkával szemben táplált megingathatatlan előítélet miatt, hanem most már azt is állították, hogy az érzékszervi észleletekből nem meríthető elsődleges értesülés a természet szerkezetére és működésére nézve. A legújabb kori tudományos gyakorlat (bár a tudománynak nem szükségképpen minden filozófiai értelmezése, amint azt az 1. fejezetben láttuk) ennek éppen az ellenkezőjén alapul: az érzékszervi észleletek elsőbbségén, akár emberi szem, akár Geiger–Müller-számláló útján nyerjük is azokat. Úgy látszik tehát, hogy Platón eszméi többet tesznek annál, minthogy csupáncsak nem hangsúlyozzák a természeti világ megfigyelését: kifejezetten helytelenítik, mint félrevezető és tökéletlen módszert a dolgok valódi természetének felderítésére,

amelyet csak tiszta gondolkodás útján lehet elérni. Ám mielőtt túl lelkesen elfogadnánk egy ilyen visszahúzó gondolatot, érdemes egy kicsit közelebbről megvizsgálnunk a platóni formákat, hogy meglássuk, nem kerülte-e el a figyelmünket Platón róluk alkotott elgondolásának valamilyen finom árnyalata. Tekintsük következő párbeszédét az *Állam* c. műből, amely Szókratész és Glaukón között játszódik, és amely világosan tartalmazza az elméleti és kísérleti tudás viszonylagos értékeiről vallott nézeteit. A dialógus eleinte a csillagászattal foglalkozik (528e–531c):

GLAUKÓN
...Arra nézve pedig, Szókratész, hogy az imént megróttál, amiért a csillagászatot nagyon is köznapi értelemben dicsértem... meggyőződésem szerint mindenki előtt világos, hogy a lelket a magasba tekintésre kényszeríti, s innen arrafelé vonja.

SZÓKRATÉSZ
Lehet, hogy mindenki előtt világos, de előttem nem; én nem így látom a dolgot.

GLAUKÓN
Hát hogyan?

SZÓKRATÉSZ
Ahogy manapság foglalkoznak vele azok, akik filozófiai magaslatra akarják emelni, csak arra vezet, hogy lefelé irányítja a tekintetünket.

GLAUKÓN
Hogy érted ezt?

SZÓKRATÉSZ
Meg vagyok győződve róla, hogy te, a magad módja szerint, igen nemesen értelmezed az égi jelenségek tudományát; nyilván úgy képzeled, hogy ha valaki felfelé tekintve, a mennyezet díszítését szemléli, s ebből valamit tanul, az is az elméjével, nem pedig a szemével szemlélődik. Lehet, hogy helyesen is képzeled, s én vagyok az együgyű. Én ugyanis nem tudom elhinni, hogy bármely tudomány a fölfelé tekintésre tudná ösztönözni a lelket, csak éppen az, amely a létezővel és a láthatatlannal foglalkozik; s ha valaki akár tátott szájjal fölfelé vagy csukott szájjal lefelé próbál is valami érzékelhető dolgot megismerni, szerintem ezt soha meg nem ismerheti, hiszen tudományról ilyesmivel kapcsolatban nem lehet szó: annak a lelke nem felfelé, hanem lefelé tekint, ha mindjárt hanyatt fekve a földön, vagy hanyatt úszva a tengeren tanulmányozná is.

GLAUKÓN
Ezt megérdemeltem; jogos volt a szemrehányás. De hogyan kell hát akkor szerinted – a mai módszerekkel ellentétben – tanulmányozni a csillagászatot, ha a tanulmánnyal használni akarunk kitűzött célunknak?

SZÓKRATÉSZ
A következőképpen. A csillagos ég díszítményeit, éppen mivel látható térben vannak, minden látható dolog közt a legszebbnek és legtökéletesebbnek kell ugyan tartanunk, mégis olyanoknak, amelyek nagyon is híján vannak a valóságnak, tehát annak a mozgásnak, amellyel a valóságos gyorsaság és a valóságos lassúság a valóságos számban és valamennyi valóságos formában egymás közt mozog, s minden benne lévőt magával visz: mindezt csak ésszel és értelemmel lehet megragadni, látással nem: vagy talán azt gondolod, hogy igen?

GLAUKÓN
Semmi esetre sem.

SZÓKRATÉSZ
A csillagos ég díszítményeit tehát csak mint példát szabad felhasználnunk ama láthatatlan dolgok megismerésére, mint ahogy például az ember elé kerülhetnek Daidalosztól, vagy más művésztől vagy festőtől pompásan megrajzolt és kidolgozott mértani ábrák is. Ha a mértanban jártas ember ezeket meglátná, talán kidolgozásukat illetőleg igen szépnek találná őket; ámde nevetségesnek tartaná oly célból való komoly tanulmányozásukat, hogy bennük az egyenlő, a kétszeres vagy másféle arány igazi értelmét fölfoghassa.

GLAUKÓN
Hogy is ne volna nevetséges!

SZÓKRATÉSZ
Nem gondolod-e, hogy az igazi csillagásznak ugyanez az érzése van, mikor a csillagok járását figyeli? Azt bizonyára elismeri, hogy az ég alkotója az égboltozatot és a rajta lévő csillagokat olyan gyönyörűen állította össze, amilyen gyönyörűen csak ilyen alkotást összeállítani lehet; de mit gondolsz, nem tartaná-e furcsának azt, ha valaki úgy vélekedne, hogy az éjjelnek a nappalhoz, mindkettőnek a hónaphoz, a hónapnak az évhez, s a többi csillagnak hozzájuk és egymáshoz való viszonya örökké ugyanúgy alakul, és soha semmiképp nem változik, holott pedig testük van és láthatók; s nem tartaná-e furcsának, ha valaki mindenáron ezeknek az igazságát akarná megragadni?

GLAUKÓN
Ez bizony – most, hogy tőled hallom – nagyon valószínűnek látszik.

SZÓKRATÉSZ
A csillagászattal is tehát – akárcsak a mértannal – csupán az általuk felvetett kérdések kapcsán foglalkozunk, az égboltozaton lévő dolgoknak azonban békét hagyunk, ha azt akarjuk, hogy a csillagászattal való igazi foglalkozás útján lelkünknek természettől fogva értelmes részét, mely eleddig haszontalan volt, hasznossá tegyük.

GLAUKÓN
Bizony sokszorta nagyobb feladatot rósz azzal ránk, mint ahogy manapság űzik a csillagászatot.
...

SZÓKRATÉSZ
Hogy növendékeink ne akarjanak ebben valami tökéletlen ismeretre szert tenni, s olyanra, amely nem jut el ahhoz a célhoz, amelyhez mindennek el kell jutnia, ahogy az imént a csillagászatról is mondtuk. Vagy nem tudod-e, hogy az összhangzattanban is hasonló eljárást szoktak követni? Ők is hiábavaló munkát végeznek – akárcsak a csillagászok –, mikor a hallható összhangokat és hangokat méregetik egymáshoz. ... én azokra gondolok [a püthagoreusokra], akiket – mint az imént mondtuk – az összhangzattanról meg akarunk kérdezni. Ezek tudniillik ugyanazt teszik, amit a csillagászat hívei; a hallható összhangokban lévő számokat keresik, ámde azoknak a kérdéseknek a vizsgálatáig nem jutnak el, hogy mely számok tekinthetők összhangzóknak, s melyek nem, s melyik miért.

(Ford. Szabó Miklós)

Itt annak az elképzelésnek a kifejeződését látjuk, hogy a világról háromféle-fajta tudás szerezhető. Az egyik véglet az evilági tudás: a csupasz tények, csillagászati megfigyelések felhalmozása. A másik: a világ mögött rejlő tökéletes ideális formák szemlélete. A kettő között van valami más: a csillagászati megfigyelés csupasz tényeinek az aritmetika és geometria segítségével való leírása és ábrázolása, amely segédeszközként szolgálhat ahhoz, hogy a megfigyelések feldolgozatlan halmazától eljuthassunk az általuk tökéletlenül tükrözött ideális formákhoz. Ez a középút, amely matematikát alkalmaz annak érdekében, hogy használható törvényekhez jusson el, „eszköz" jellegű volt. Hasznos volt, de semmiképpen sem egyedülálló.

A szópárbaj bevezető mondataiban Szókratész a tőle elvárt platóni álláspontra helyezkedik, és azt bizonygatja, hogy a földön kívüli jelenségek megfigyelése nem vezet a valóság mélyebb megértéséhez. Ilyen mélységek tényleges dolgok érzékszerveink általi megfigyelésével nem, csupáncsak elméleti szemlélődés útján érhetők el. Az ideális formák, amelyek keresésére a csillagászt ösztönzi, azt képviselhetik, amit ma természeti törvényeknek neveznénk, vagy úgy lehetne elképzelni őket, mint amit a mai fizikus „ideális

gáznak", „súrlódásmentes felületnek" vagy „tökéletesen rugalmatlan ütközésnek" nevezne. Vagyis ezek idealizált dolgok, amelyekről tudjuk, hogy különböznek a megfigyeltektől, de a különbség lényegében ártalmatlan; az „ideális gáz" rendelkezik a valóságos gázok főbb tulajdonságaival, és lehetővé teszi, hogy egyszerű elméleti szabályszerűségekre következtessünk.

Platónnak a tökéletes formákat illető idealizmusa bizonyosfajta instrumentalizmussal párosul. Azt javasolja a csillagászoknak, hogy olyan geometriai modelleket dolgozzanak ki, amelyek „megóvják a látszatot", azaz leírják azt, amit látunk, de nem állítják róla, hogy a mögöttes valóság ábrázolása. Később ezt a programot Ptolemaiosz hajtotta végre (i. sz. 65–165), aki azt az antirealista platóni nézetet tette magáévá, mely szerint az égitestek mozgásának általa készített leírása hasznos eszköz annak összefoglalására, ami látható. Ez többféle különböző leírással is elérhető, ám természetesen a legegyszerűbbet választották, mint az adott célra a leghasznosabbat.

Az ideális formák doktrínájának, vagy ahogy ismertté vált: a platóni idealizmusnak a tudományra gyakorolt közvetlen hatásáról elmondható, hogy még inkább háttérbe szorította az alkalmazott tudományt, és a figyelmet annak misztikus keresésére irányította, hogy *mik* valójában a dolgok, ahelyett, hogy miképpen viselkednek. Még ha nem volt is idegen tőle a természeti törvények fogalma – az az igazság, amely magasabb rendű, mint az egyes példák igazsága –, e törvényeket a megfigyelések és mérések világán kívülre helyezte.

Bevégezve Platónnak a természet tervrajzai keresésére gyakorolt hatásával foglalkozó rövid tárgyalásunkat, valószínűleg abban kellene megegyeznünk, hogy a formák tanának közvetlen hatása a tudományos kutatás fejlődésére nézve végzetes volt. A megfigyelt jelenségeket félrevezetőnek minősítették. A végső igazság megfigyelhetetlen és anyagtalan volt. Kétségtelenül voltak jó oldalai is az absztrakt gondolkodás ugrásszerű fejlődésének, a valóság és látszat különbsége később fontossá is válik, ez azonban csak egy részletekbe menő adatgyűjtési időszak végeztével következhet be. Platónt éppen egy ilyen gyakorlati beállítottságú filozófus követte.

Arisztotelész

> Mindannyian hajlamosak vagyunk arra, hogy kutatásaink irányítását ne az anyagra bízzuk, hanem bírálóink véleményére, és még ha saját magunkkal vitázunk is, vizsgálatunkat csak addig a pontig terjesztjük ki, ahol már nem találkozunk ellenvetésekkel.
>
> Arisztotelész

Arisztotelész i. e. 384-ben született Sztageirosz városában, egy ión településen az Égei-tenger északi partvidékén. Apja Makedónia királya, II. Amüntasz udvari orvosa volt, és bár mind ő, mind felesége meghalt, még amikor Arisztotelész kisfiú volt, úgy látszik, hogy ez a gyermekkori érintkezése a gyakorlati tudománnyal kitörölhetetlen benyomást tett rá. Tizenhét évesen belépett az Akadémiára, Platón tanítványa volt, és tanulmányait platóni mintára készült párbeszédek írásával kezdte, hasonlóképpen ahhoz, ahogy a mai tudóspalánták a kutatómunkában végzendő tanoncidejüket valamilyen gyakorlati feladat kidolgozásával vagy a mentoruk által már megoldott problémák valamelyikének egyszerű általánosításával kezdik. Platón halála után elhagyta Athént, valószínűleg azért, mert nem kedvelte azt az egyre terjedő irányzatot, amely a természetről való filozófiai gondolkozást a geometria egyik ágává tette. Nem hitte, hogy a tudomány helyesen cselekszik, amikor csak „megőrzi a látszatot" azáltal, hogy *valamiféle* hasznos geometriai leírását adja annak, ami látható. Realista volt, aki a természetről alkotott elméleteket saját helyükön akarta látni – a dolgok tágabb filozófiai rendszerén belül.

Önként vállalt száműzetése idején ébredt fel későbbi érdeklődése a növény- és állatvilág iránt, leghíresebb élménye azonban a nevelőként eltöltött időszak volt egy kamasz, II. Philipposz makedóniai király fia mellett, akit egy napon majd Nagy Sándorként ismer meg a világ. Amikor apja i. e. 336-ban bekövetkezett halálakor Sándor hatalomra került, Arisztotelész visszatért Athénbe, és új iskolát alapított, amely Líceum néven vált ismertté. Ezen az ősi egyetemen aztán nekilátott, hogy részletesen tanulmányozzon mindent, amit csak lehet. A Líceum Athénben és Alexandriában körülbelül hatszáz éven át működött, míg előképe, Platón Akadémiája több, mint kilencszáz évig fennmaradt Athénben. Mindkét intézmény neve egészen a mai napig színesíti a nevelést, és a világ ma is bővelkedik „akadémiákban" és „líceumokban".

A mai tudósok rendkívül elutasítóan viszonyulnak Arisztotelészhez és művéhez. Ez nagyrészt azért van így, mert Arisztotelészt nem a saját írásaiból, hanem az „arisztotelianizmus" torzító tükréből, ennek a középkori skolasztikusok által kifejlesztett és terjesztett gondolati útvesztőnek az alapján ismerték

meg. A reneszánsz felszabadult tudósainak megvetését ez a dogmatikus tan váltotta ki. Ám saját korszakuk intézményesített nézeteivel való minden vitájuk ellenére a reneszánsz tudósok, mint például Galilei, magát Arisztotelészt mint filozófust és mint tudóst is a legnagyobb csodálattal övezték. Még a XIX. században is Charles Darwin a legnagyobb természettudósnak tartotta. Tagadhatatlan, hogy ő a valaha élt legnagyobb hatású gondolkodó.

Arisztotelész hatása a természeti törvények eszméjére kissé kétértelmű. Egyfelől életbevágó fontosságú volt, hogy Platón idealista befolyása után felkeltette az érdeklődést az empirizmus iránt, másfelől viszont a természeti jelenségek okait illetően terméketlen gondolkodásmódot vezetett be, amely aztán csaknem kétezer éven át akadályozta a természet helyes megértését. Írásai egészen a reneszánszig a legfelsőbb és végső tekintélyt testesítették meg a nyugati gondolkodásban, és oly mértékig dogmatikussá váltak, amelyet – folyamatosan továbbfejlődő eszméiből ítélve – ő maga biztosan visszataszítónak talált volna.

Míg Platón elfordította tekintetét a világias, mindennapos jelenségektől, és követői figyelmét a tökéletes formák képzeletbeli világa felé irányította, Arisztotelész evilági ember volt. Mint szenvedélyes realistát, mindenekelőtt a természeti világ részletes megfigyelése érdekelte, és iskolája munkáját ennek megfelelően szervezte. Botanika, biológia, geológia, csillagászat: mindezeket a tárgyakat rendszeresen és mély részletességgel tanulmányozták. Állatokat boncoltak, mintapéldányokat gyűjtöttek és katalogizáltak. E tevékenységek némelyikében Arisztotelész személyesen is részt vett, míg másokat legrátermettebb munkatársaira bízott.

E gyakorlati tanulmányokat mint fontos kutatási irányzatokat elindítani és legtehetségesebb munkatársait rábírni, hogy ezekben részt vegyenek – mindez jelentős vívmány volt. Olyan emberekkel kellett együtt dolgoznia, akik át voltak itatva platóni előítéletekkel az anyagi dolgokkal való foglalkozás iránt, nem is beszélve holmi férgek és bogarak vizsgálatáról. Az ifjú tanulók, akik a világegyetem mögött rejlő láthatatlan tökéletesség végső természetéről írandó új és nagyszabású elgondolásokról álmodoztak, hirtelen kukacok kiásásával és döglött kutyák belső szerveinek vizsgálatával találták szemben magukat. Valóban, még ma is, vajon hány filozófiaprofesszor örülne tevékenysége ilyen mértékű átszervezésének?

A hangsúly teljes áttevődése a megismerhetetlen dolgokról való elvont, megalapozatlan, elméleti okoskodásról a megfigyelt dolgok józan vizsgálatára jelentős és létfontosságú teljesítmény volt. Arisztotelész felismerte, hogy a természetről való okoskodást olyan kritérium alapján kell megítélni, mely valamivel szigorúbb annál, mint az, hogy képesek vagyunk-e érveink logikáját ellenfeleinkkel szemben filozófiai vitában megvédeni.

Így tehát, amikor adva volt szenvedélye a természeti jelenségek megfigyelése iránt, megvetése Platón követőinek fellegjáró filozófiája iránt és ellenkezése a természet misztikus geometrizálása iránt, melyet a püthagoreusok űztek előszeretettel, miért nem következett be tudományos forradalom?

Arisztotelész az adatok gyűjtését és osztályozását hangsúlyozta, de nem érdekelte a tények egymásra vonatkoztatása úgy, ahogyan ezt egy mai tudós próbálná tenni. Továbbá azt sem kísérelte meg, hogy egyes feltételezések ellenőrzésére végzett kísérletekkel a természetet mesterséges úton befolyásolja. Nem keresett változásokat kódoló természeti törvényeket, és nem ismert fel szabályosságokat ok-okozati láncolatokban. Ez a vakfolt nem véletlen kihagyás volt, hanem a dolgok természetéről és a viselkedésüket irányító törvényekről alkotott nézeteinek elkerülhetetlen következménye.

Míg Platón a dolgokat látszatokra és egy másik világban létező formákra (ideákra) osztotta, Arisztotelész csak ennek a világnak megfigyelhető dolgait tekintette valóságosnak és tanulmányozásra méltónak. Ám két oldalát különböztette meg a látható és tapintható dolgoknak. Ezeket „formának" és „szubsztanciának" nevezte. Éppúgy, mint Platón, hitt az időtlen, változatlan formák létezésében, de az ő ábrázolásában ezek a mi világunk tárgyainak benső tulajdonságai voltak, nem elvont minták egy óriási égi tervezőműhelyben. A „szubsztancia" anyag volt, az tehát, amit megérinthetünk és kezelhetünk, a „forma" azonban az a sajátos megvalósulás, amit kapott, elménk pedig elvont gondolkodás útján tudja bármilyen megfigyelhető tárgyban felismerni a formát. A forma az a valami volt, amilyenné a szubsztancia alakult. A különbség világos számunkra: a forma nem létezhet ama szubsztancia nélkül, amely kifejeződéséhez szükséges, és minden szubsztanciának valamilyen formája kell hogy legyen, bár ez a forma az idő múlásával változhat.

Tegyük fel, hogy fészert építünk a kertben. A szubsztancia lehet például fa (az Arisztotelész által a „szubsztancia" kifejezésre használt szó tulajdonképpen „faanyagot" jelent,* korának szokásos építőanyagát), és meg is marad annak, az alak- és formaterv azonban, amely megkülönbözteti a végeredményt egy farakástól, az a forma. Ez a forma időben változhat, ahogy a szél, az eső és a korhadás megváltoztatja a fészer kinézetét.

A formának ez az eszméje bizonyos módon saját nyelvünket is befolyásolta, mert amikor arról beszélünk, hogy valakit „in*form*álunk", ezen azt értjük,

*A görög szó: *hülé*. – *Fehér Márta*

hogy valamilyen elvont gondolatot akarunk átadni elméjébe, és az ilyen gondolatok gyűjteményét „*in*formációnak" nevezzük. Az információ manapság különféle anyagokon tárolható – emberi emlékezetünk idegpályáin, papíron, mágnesszalagon vagy fekete táblán. Platón elvont, ideális formáitól eltérően Arisztotelész formái a dolgok*ban* benne voltak. Ez a gondolkodásmód vezetett a természeti jelenségek okairól alkotott sajátos nézeteihez. Durván fogalmazva az okokat és okozatokat a dolgok lényegéből eredő tulajdonságoknak tartotta, nem pedig az események közti viszonyoknak, mint a mai tudósok. Így például a holdfogyatkozást a Hold sajátosságának tekintette, nem pedig a Hold-mozgás következményének. Erről az alapról kiindulva a dolgok *négy* különféle „okát" különböztette meg.

A vetélytárs atomista filozófiai iskola azt állította, hogy egy dolog teljesen megmagyarázható, ha tudjuk, miből készült. Arisztotelész ez ellen azt az érvet hozta fel, hogy a dolog összetételéről szóló információ csak annak szubsztanciáját adja meg, és ily módon csak – ahogy ő nevezte – „materiális okát" ismerjük meg: a fát, amelyből fészerem épült. Ahhoz, hogy egy dolgot teljesen megértsünk, három további okot is ismernünk kell. Azonosítani kell egy „formális okot", ez adja meg a dolog formáját vagy típusát. Ezután a „ható-okot" *(causa efficiens)* keressük: meg kell határozni azt a tényezőt, amely közvetlenül létrehozza a tárgyat, valamilyen anyagba öltöztetve a formát – ez fészerem építője. Ez a „ható-ok" áll legközelebb ahhoz, amit a mai tudósok „oknak" neveznének. Végül pedig következett az, ami számára a legfontosabb ok volt, a „vég-ok" *(causa finalis)* – a cél, amiért a tárgy létezik. A vég-okok eszméjéből egy teleologikus nézet alakult ki, mely szerint az események szükségszerűen valamilyen cél felé tartanak, mintha csak mágneses vonzást gyakorolna rájuk. Ez az eszme később létrehozott egy világnézetet, amely több mint egy évezreden át uralta a nyugati gondolkodást.

Általánosságban szólva a görögök élő szervezetnek, nem pedig órához hasonlatos szerkezetnek tekintették a világegyetemet, aminek sok köze van Arisztotelész vég-okaihoz, mert az élőlények igenis megengedhetik maguknak a célszerű viselkedés fényűzését, és ha az ember úgy hiszi, hogy a világ az élő szervezet módjára működik, akkor arra a következtetésre jut, hogy a természeti eseményeknek célja van. A mechanikus és szervetlen világban fellelhető szabályszerűségeknek megvan az a nyilvánvaló vonásuk, hogy a múltbeli okok határozzák meg a jelent: belerúgunk egy kődarabba, mely aztán elgurul. Az élőlények világában azonban ez a viszony felületesen szemlélve, éppen az ellenkezője. Úgy tetszik, mintha a jövő határozná meg a jelent: egy jövőbeli cél érdekében cselekszünk, a mókusok diót gyűjtenek, hogy felkészüljenek téli álmukra. A természeti világnak ez a teleologikus vetülete, valamint Arisztote-

lésznek az állatok viselkedése iránti különleges érdeklődése vezetett ahhoz, hogy a vég-okokat első helyre tegye a „négyféle ok" sorában.

S hogy a világ ilyetén szemléletéből milyen következtetést vonunk le, az attól függ, milyen elképzelést alakítunk ki a „véget" illetően, amely felé az események céltudatosan irányulnak. Arisztotelész ezt a „véget" nemcsak azzal jellemezte, hogy mi történik utoljára, hanem egyedülálló harmóniájú állapotnak tekintette. Ilyen állapotot igyekeznek a dolgok természetes módon elérni, és minden mozgás ezzel a törekvéssel összhangban történik.

Ez a nézet később akadályokat gördített a tudomány előrehaladásának útjába. Az az eszme, hogy a világegyetemet élő szervezetnek kell tekinteni, nem pedig gépnek (amint azt az újkori világ volt vélni hajlamos) furcsa, de aligha váratlan gondolat egy olyan gondolkodótól, aki egy technikával és gépekkel kapcsolatban tapasztalatlan civilizációban első ízben mélyedt el az élő szervezetek tanulmányozásában. Jól szemlélteti ez a gondolat, hogy mi volt mindig is a hibás tudományos okoskodás fő forrása: nem annyira a helytelen adatok vagy elméletek, mint inkább az a téves hit, hogy egy teljes gondolathalmaz, amely sikeresen alkalmazható az egyik jelenségre, átvehető és felhasználható egy másik, teljesen különböző jelenség leírására, azaz a hamis analógia.

A vég-okok bevezetése a jóváhagyás hiteles pecsétjét nyomta egy olyan gondolkodásmódra, mely elvétve ugyan Arisztotelész előtt is jelentkezett, de később uralkodóvá vált a nyugati világban. Ha a természet valóban valamilyen cél felé halad, akkor milyen jobb cél is létezhetne, mint az emberiség java? Ezekből a kezdetekből alakult ki az ún. „tervezési érvek" hagyománya: azoké a magyarázatoké, amelyek szerint a dolgok azért vannak úgy, ahogyan vannak, mert Isten az ember javára vagy pedig a tökéletes harmónia megteremtése céljából alkotta őket. A természeti törvények pedig azért vannak, hogy a világegyetemet emberi tartózkodásra megfelelő hellyé tegyék. Tényleges formájukat annak köszönhetik, hogy célirányosak. Ezt követően azok a gondolkodók, akik Arisztotelész filozófiai sémáját teológiai célra akarták felhasználni, egy további „első okot" szoktak fűzni Arisztotelész négy „okához". Korábbi példánknál maradva ez a kerti fészer Teremtője vagy (egyszerűbben fogalmazva) kezdeményezője. Láthatjuk, milyen csábító az első és vég(ső) okok szimmetriája egy olyan teológia számára, mely Istenről mint az Alfáról és Omegáról beszél. Teilhard de Chardin misztikus eszméi, amelyek meglepő érdeklődést keltettek a legutóbbi időkben, olyan teleologikus kozmológiai világnézetet írnak le, melyben az evolúció az általa Omega pontnak nevezett végső ok felé halad.

A vég-okok eszméjének bevezetése végzetes hatással volt az újkori értelemben vett tudomány közvetlen fejlődésére. Egy egészségesebb, rövid távú

hatáshoz arra lett volna szükség, hogy a figyelem a ható-okok jellegében felismerhető irányokra és szabályszerűségekre összpontosuljon. Bár a korai atomisták érdeklődésüket valóban csak a ható-okokra korlátozták, nézeteik csak sokkal később hatottak, amikor újra felfedezték őket. Arisztotelész filozófiájának a tomista római katolikus hagyománnyal való későbbi szintézise a vég-okság kizárólagos voltát volt hivatott hangsúlyozni a látható dolgok elégséges magyarázataként. Isten létezésének bizonyítására ezzel a doktrínával hozakodtak elő a leggyakrabban, amely hangsúlyában rendkívül antropocentrikussá vált, amennyiben az ember jólétét minden természeti jelenség céljának és alapvetően *a* természeti törvénynek tekintette.

Arisztotelész azonban mégsem volt ennyire együgyű, amikor eszméjét eredetileg megfogalmazta. A vég-okok eszméjét tekintve nem volt ő sem antropocentrikus, sem animista. Bár a kő a Föld felé hajlamos esni, nem *szándékosan* teszi ezt. A vég-okot azért vezette be, mert úgy vélte: ha a mozgások leírására csak a másik három okot használjuk fel, akkor a természeti folyamatok kritikus módon meghatározatlanok maradnak, még mindig bármi megtörténhet. Ez a kétértelműség azonban elkerülhető, ha minden ható-okot valamilyen vég-okkal kapcsolunk össze. Arisztotelésznek az égitestek mozgására vonatkozó csillagászati tanulmányaiban a mozgás vég-oka valóban az, amit mi természeti törvénynek neveznénk, abban az értelemben, hogy ha ismert a mozgás állapota egy adott időpillanatban, valamint a vég-ok, akkor ez meghatározza, hogy az égitestek hogyan fognak a jövőben mozogni. A tényleges jövőbeli mozgás teljes részletességgel körül van írva. Elsőre úgy látszik, hogy a ható-okokból lettek a mozgástörvények, míg a vég-okok mint peremfeltételek működnek, amelyek a mozgást egyedileg meghatározottá teszik (bár ezek végponti, nem, mint manapság szokásos, a kiindulóponti, vagyis kezdeti peremfeltételek), ám a legújabb időkben a vég-okok lettek a mi természeti törvényeink, a ható-okokból pedig a természeti erők, amelyeket a törvények leírnak.

Utólag azt is világosan látjuk, hogy bár Arisztotelész különféle okokból álló rendszere általánosságban valóban megvilágítja a dolgok különböző, elvont oldalait, meglehetősen homályossá válik, ha az egyes dolgokra összpontosítunk. Végtelen a sora a kerti fészerem építésével kapcsolatba hozható közvetett „okoknak". A favágók, akik kivágták a fákat, a fák növekedését lehetővé tevő természeti környezet, az a személy, akiben először megszületett a faházikó gondolata: a lista végtelen. Túl sok a lehetséges ok, ha az ember az iránt érdeklődik, „miért" történnek a dolgok, ahelyett, hogy egyszerűen azt kérdezné: „hogyan". A célkitűzések számottevő korlátozása által válhatott csak termékennyé és egyúttal egyértelművé a tudományos módszer.

Arisztotelész mozgástörvényei

Adott súly adott idő alatt adott távolságot tesz meg; egy nehezebb súly ugyanakkora távolságot kevesebb idő alatt tesz meg, mert az idő fordítottan arányos a súlyokkal.

Arisztotelész

Arisztotelész inkább szavakban, mint képletekben fogalmazott meg mozgástörvényeket (ez utóbbi csak Galilei után vált általános gyakorlattá), ám hasznos ezeket képletekkel is kifejezni. Azt állította, hogy egy testre gyakorolt erő *(F)* arányos a mozgásával szemben fellépő ellenállással *(R)*, és az a sebesség *(V)*, amellyel mozog, szintén arányos a rá gyakorolt erővel *(F)*, mindaddig, míg a mozgást okozó erő meghaladja *R*-t. Ha nem haladja meg, akkor nincs mozgás. Algebrailag tehát

$$V = kF/R, \qquad \text{ha } F > R$$

$$V = 0, \qquad \text{ha } F \leq R, \tag{2.1}$$

ahol k az arányossági tényező. Ezenkívül a nehézségi erő hatására zuhanó testeknél az elért sebesség arányos a test súlyával *(W)*, de fordítottan arányos a légellenállással, így

$$V = kW/R. \tag{2.2}$$

Ebbe a formába öntve Arisztotelész „mozgástörvényei" újkori értelemben vett tudományos törvényeknek látszanak, ám ez félrevezető. Valójában csupán annak leírásai voltak, hogy miképpen illenek bele a mozgó testek a végső okság doktrínájába. A szabadon eső testek azért esnek a földre, mert ez a természetes. Az efféle okfejtés természetesen semmit sem magyaráz meg, csak más szavakkal fejezi ki a rejtélyt. A fent leírt mozgástörvényeket soha, semmilyen módon nem használták arra, hogy többet tudjanak meg arról, hogyan mozognak a testek, és kísérleti ellenőrzésnek sem vetették alá őket. Ha összevetették volna őket azzal, ami a valóságban történik, eltérések mutatkoztak volna. Ezek a törvények egyáltalán nem furcsák. Olyanok, amilyeneket okos hatodikos diákoktól elvárhatunk, ha korábban soha nem találkoztak a józan ésszel és mindennapi tapasztalaton kívül más elképzeléssel a mozgástörvényekről. Néhány éve egy amerikai fizikus egy felmérés eredményét közölte, amelyet fizikából intézményes képzésben soha részt nem vett amerikai egyetemisták körében végzett. Kérdőívében a mindennapi tapasztalaton alapuló ösztönös gondolataikat próbálta meghatározni az erőhatásnak kitett

testek mozgásáról. A leggyakoribb válaszok figyelemreméltó egyezést mutattak Arisztotelész nézeteivel, melyeket jogosan tekinthetünk a józan ésszel való megközelítésnek. Az újkori tudomány természetesen nem a józan ésszel való megközelítésen alapul, elsősorban azért nem, mert mindenekelőtt az éppen elfogadott nézet cáfolatára, kritikájára vagy javítására törekszik. Valaminek a „józan eszű" nézete egy, a már ismert adatokból kikristályosodott leírás, amelynek velejárója bizonyos fokú vonakodás a változások elismerésétől, hiszen nevéből következik, hogy bármiféle eltérés ettől különösen ésszerűtlen volna. Felszínesen tekintve rendkívül ésszerű feltételezni, hogy ha egy golyót helyezünk az asztalra, és gyengéden meglökjük, akkor eleinte nem mozdul – a mozgással szemben ellenállás hat – ám hirtelen, amint az alkalmazott erő nagyobb lesz, mint a kritikus ellenállás, elkezd mozogni. Ezután minél erősebben lökjük, annál gyorsabban kell mozognia.

Ha azonban közelebbről megnézzük a (2.1) képletek által megadott törvényt, kínos folytonossági hiányra leszünk figyelmesek. Ha F R-nél magasabb értékről indul, és folyamatosan csökken, akkor kezdetben V folyamatos csökkenése várható; ám (2.1) szerint, amikor F eléri R értékét, a k értékről egy pillanat alatt nullára kell esnie. Itt folytonossági hiány van (lásd a 2.1 ábrát). Ezt a tényt néhány középkori szövegmagyarázó problematikusnak tartotta, és a XIV. században az oxfordi Thomas Bradwardine felvetette, hogy az összefüggést felül kellene vizsgálni, és „folytonosabb" formát kellene adni neki, amit most már így fejezhetünk ki:

$$V = \log (F/R). \tag{2.3}$$

Ennek az egyenletnek az az előnye, hogy folytonos és van határértéke, ugyanis $V \to 0$, ha $F \to R$. A logaritmus matematikai fogalmát formálisan csak a XVII. században vezették be – Bradwardine geometriai érvek segítségével jutott el a (2.3) képlettel egyenértékű eredményre (lásd a 2.1 ábrát).

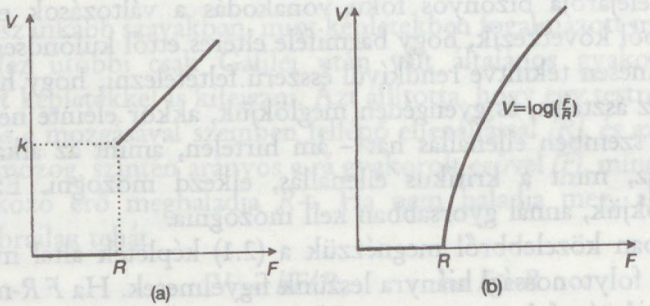
Már az alexandriai Ióannész Philoponosz, egy VI. századbeli Arisztotelész-kommentátor is javasolta a (2.1) egyenlet (másféle) módosítását, amely szintén megoldja a folytonossági problémákat:

$$V = F - R, \tag{2.4}$$

így újra $V \to 0$, amint $F \to R$.

Egy másik kellemetlen eredmény, mely Arisztotelész (2.1) törvényéből és Bradwardine módosításából (2.3) is következik, de Philoponoszéból nem, az az, hogy amint az ellenállás nullára csökken, a test V sebessége végtelen naggyá válik. Arisztotelész tudatában volt ennek a fizikai elvekkel ellenkező következ-

ménynek, de arra használta bizonyítékul, hogy légüres térben (ahol nyilvánvaló, hogy $R = 0$) semmilyen mozgás nem lehetséges, és ebből arra következtetett, hogy légüres tér nem létezik. Ezzel az érveléssel a riválisatomista filozófiai elképzelésekkel szállt szembe, melyek szerint a mozgás az „űr"-ben, vákuumban történik.



2.1 ábra. *a)* Arisztotelész mozgástörvényének grafikus ábrázolása, amely megadja egy külső F erő hatására R ellenállás mellett elért sebességet. Valószerűtlen folytonossági hiány áll fenn, amint F ellenkező irányokból megközelíti R értékét. *b)* Kísérlet a folytonossági hiány megszüntetésére: a XIV. században Thomas Bradwardine által javasolt logaritmikus mozgástörvény.

Arisztotelész kora után, az Akadémia és a Líceum hagyományainak folytatódása idején a görög világban még sok kiváló tudós működött. Arkhimédészt, Arisztarkhoszt és Ptolemaioszt minden idők legnagyobb elméi között tartjuk számon. Néhányan, mint Arkhimédész, technikai és kísérleti természetű munkát végeztek, a tiszta gondolkodást és az érvelés matematikai formáját mégis magasabbrendűnek tartották gyakorlati munkájuknál, s ezért nem voltak hatással a természeti törvények keresésére a következő történelmi időszakban. Több mint egy évezreden át Arisztotelész teleologikus szemlélete uralta a természeti világról való gondolkodást.

Az arisztotelészi örökség

> Különös volna, hogy míg az egész természet, minden bolygó örök törvényeknek engedelmeskedik, lenne egy kicsiny, öt láb magas állat, mely e törvényeket megvetve úgy cselekedhetne, ahogyan jólesik neki, kizárólag saját szeszélyeit követve.
>
> Voltaire

Ha Arisztotelész csak óriás lett volna más óriások között, kétségtelen, hogy tudományos hírneve ma csak annál nagyobb lenne. A tudáshoz és a logikához való hatalmas hozzájárulását követőinek meg kellett volna ragadniuk és kiindulási pontként használniuk jövendő kutatásaikhoz. Ebből az ösztönzésből bontakozhatott volna ki fokozatosan az okokról való gondolkodás és tudás. Ha így történt volna, akkor ma Arisztotelészt bizonyára mint a mindent elindító újítót ünnepelnénk. Sajnálatos módon azonban a tudományos élet nem jött lendületbe. Bár a Líceum Arisztotelészt követő két vezetője kritizálta a vég-okok korlátlan felhasználását annak magyarázatára, miért történnek a dolgok úgy, ahogy a megfigyelések mutatják, sem Theophrasztosz, sem Sztráton nézeteit nem ismerték el széles körben. Így Arisztotelész teleologikus eszméi ereklyévé kövesülhettek, amelyhez – mint mintához – minden új gondolatot hozzámértek.

A mintát azután tökéletesként kezdték tisztelni. Halála után ezer évvel Arisztotelész írott véleményét bármilyen tárgyban teljes mértékben perdöntőnek ítélték. Logikai írásait középkori tudósok az „Organon" vagy „Instrumentum" (Eszköz) néven ismertté vált szabálykönyvben gyűjtötték össze, mert minden tudás kulcsát vélték felfedezni bennük. 1620-ban, amikor Francis Bacon, I. Jakab később vád alá helyezett lordkancellárja hatásos értekezést írt a tudományos kísérleti módszerről, a *Novum Organum* („Új eszköz") címet adta művének, hogy hangsúlyozza feltételezett felsőbbrendűségét az arisztotelészi dogmákhoz képest.

Mind Krisztus, mind Mohamed követői egyformán könnyen térítették át Arisztotelészt a saját hitükre. Sajnálatos módon Arisztotelész gondolkodásának az az oldala, amely a teológusokat vonzotta, a vég-okok doktrínája volt. Ez a rossz helyre került hangsúly, valamint a világegyetemnek inkább élő szervezetként, mintsem gépezetként való ábrázolása uralta a középkor intézményes gondolkodását. Fokozatosan kialakult az a szokás, hogy a vég-okokat Isten vagy az istenek létezése mellett szóló bizonyítéknak tekintsék és akként is értelmezzék. A legkorábbi, összefüggően kifejtett ilyenfajta mű Cicerónak *Az istenek természete* c. dialogikus írása. Kissé különböző formában ugyanez követhető végig Galenus munkáiban is, akinek orvosi tárgyú munkássága később ugyanolyan tekintélyre tett szert, mint Arisztotelész művei más területeken. Azt a tényt, hogy az ember szervei vagy igen alkalmasak arra a célra, amelyet szolgálnak, vagy pedig műszakilag tökéletesek, amellett szóló bizonyítéknak tekintette, hogy az Istenség tervezte e szerveket tökéletesnek szerepük betöltésére. Innen már csak egy kis lépés úgy érvelni, hogy a természetben mindenütt fellelhető sok-sok példa a gyönyörű „formatervezésre" – így az emberi szem bonyolultsága, vagy az, hogy az állatok tökéletesen illeszked-

nek élőhelyükhöz és így tovább – tulajdonképpen bizonyíték a nagy Tervező létére, aki nemcsak egyedülvaló, hanem az az Isten, akiben az ember más okokból hisz. A természeti törvények antropocentrikusak, és a megfigyeléseket ennek fényében értelmezik, ahelyett, hogy a törvények helyességét ellenőriznék.

Az efféle gondolkodásmód akadályozza a természet működését irányító törvények bárminemű hasznosítható kutatását, mert így nagyon könnyű felszínesen fölöttébb kielégítőnek látszó „magyarázatokat" alkotni, amelyekről azonban közelebbről megvizsgálva kiderül, hogy az égvilágon semmivel nem mozdítják elő a világ megértését. Ha a nap azért süt, hogy az emberiséget melegítse, akkor nem látszik szükségesnek tovább kutatni természetét. Ez a gondolkodásmód meglehetősen vonzó az olyan filozofikus elmék számára, akik Arisztotelésznek a dolgok természetéről vallott általános nézetét meg akarják tartani, de nem vállalják a természeti világ részletes megfigyelésének világias terhét. Még ha az ember természete szerint hajlamosabb is megfigyeléseket végezni, mint platóni módon elméleteket gyártani a világról, minden megfigyelésében megjelenik az az előítélet, hogy a világot az antropocentrikus cél megnyilvánulásaként értelmezze. A tervezés tanújeleit keresi, ahelyett, hogy szenvedélymentesen, mindenre kiterjedő gondossággal adatokat gyűjtene mindarról, amit megfigyelt. A természetben előtalálható dolgok céljáról alkotott előítéleteinkkel ellentétesnek látszó példákat minden további nélkül figyelmen kívül hagyja. A természet tanulmányozása már nem az igazság világi keresése, a természet ismét értelmezés tárgyává válik. A természet tanulmányozása megszűnik a világ működésének vizsgálata lenni, olyan bizonyítékok keresésévé válik, melyek alátámasztják az ember hitét abban, hogy miért működik. A „Hogyan?" pusztán arra szolgál, hogy megerősítse a „Miért?"-be vetett hitet.

Egészen a középkorig tartotta magát az a nézet, hogy az anyagi tárgyak bizonyos természetes szimpátiákat és antipátiákat mondhatnak magukénak, melyek hatására a természetben elfoglalandó természetes helyük felé törekszenek. Míg ma a dolgok *közötti* viszonyt tartjuk célszerűnek hangsúlyozni annak érdekében, hogy viselkedésüket leírhassuk, a középkoriak a dolgok veleszületett rokonszenvei után kutattak azt felderítendő, hogy *miért* viselkednek úgy, ahogy viselkednek.

Ez a teleologikus szemléletmód, mivel minden megfigyelt tényt jelentéssel és értelmezéssel ruházott fel, nem segítette elő, hogy a megfigyeléseket számos közönséges kutató végezze, olyanok, mint akik ma a tudományos ismeretek fő áramlatának folyamatos előrehaladásáért felelősek. Az idejétmúlt eszmék és gyermeteg előítéletek béklyóinak lerázásához lángelmékre van szükség, ám a tudományos haladás földcsuszamlását nem ők viszik véghez, azt csak elindítják.

Arisztotelész teleologikus, de realista nézeteit végigkísérte az a platóni, instrumentális nézet, mely szerint a természet matematikai törvényei nem többek hasznos leírásnál. Úgy látszik, az instrumentalista nézet egészen a reneszánszig uralkodó volt. Ptolemaiosz a saját csillagászati elképzelését hasznos leleménynek tartotta, mely képessé tette a bolygók helyzetének előrejelzésére, és hasonló nézetet szerkesztettek bele Arisztotelész és a zsidó-keresztény hagyomány skolasztikus összeötvözésébe olyan tudósok, mint Maimonidész és Aquinói Tamás, akik Arisztotelész fizikájába és Ptolemaiosz csillagászatába vetett hitüket próbálták összebékíteni. Az utóbbiban „tökéletlen", nem kör alakú pályán játszódó mozgások is szerepeltek, és így vagy helytelennek kellett ítélni az egészet, vagy a valós csillagászati rendszer tökéletlen ábrázolásának. A kopernikuszi forradalom részben azért volt forradalom, mert felvetette, hogy a heliocentrikus elmélet nemcsak a látszat ábrázolása, hanem a dolgok *tényleges* állásának leírása. Emlékezzünk csak arra, hogy Andreas Osiander Kopernikusz művéhez írott névtelen előszavában (melyet a tudós tudta nélkül csatoltak a műhöz, és első ízben csak halálos ágyán olvashatta, amikor 1543. május 24-én kézhez kapta a *De Revolutionibus* első nyomtatott példányát), a nagy csillagász realista szándékainak ellentmondva próbálta a közlés előtti komolyabb hírverést ellensúlyozni, azt állítva, hogy „nem szükséges, hogy ezek a hipotézisek igazak vagy akár csak valószínűek legyenek; elegendő, ha olyan számítási eljárást adnak a kezünkbe, mely összhangban van a megfigyelésekkel". Osiander értékelése, bár Kopernikusz szándékával ellentétes, bizonyos mértékben mégis lényeges, ha másért nem, azért, mert Kopernikusz igen nagyszámú epiciklust épített be elméletébe annak érdekében, hogy Ptolemaioszhoz híven „megóvja a látszatot". Kopernikusz követői azonban később ragaszkodtak a természet leírásának valóságosságához. Ezt a nézetet kellett védeniük, mert első ízben használták a földi fizika pontos, kvantitatív törvényeit az égitestek mozgásának magyarázatára.

Természeti törvények és szabályok

> Ennek az egész csodálatos mozgalomnak az egyik legfurcsább és legbosszantóbb vonása az, hogy úgy látszik, egyetlen nagyszerű képviselője sem látta elég világosan, mit csinál és hogyan csinálja.
>
> E. Burtt

Hosszú időbe tellett, amíg a „természeti törvény" kifejezés nyíltan megjelent a tudományos munkákban. A görögök nem használták rendszeresen ezt

a kifejezést, mely mostani alakjában először Roger Bacon (1210–1292) optikai tanulmányaiban jelenik meg, amikor a fényvisszaverődés és a fénytörés törvényeiről és „a természet törvényeit nem követő" dolgokról ír. A „törvény" *(lex)* szót is nagyrészt ugyanúgy használja a természet szabályszerűségeinek leírására, mint mi. Ezt a gondolatot azonban nem az egyetlen isteni törvényhozó vallásos fogalmából meríti, ahogy várnánk, hanem a jelenségek tényleges osztályaira számos különböző szabályt lát érvényesnek. Nem azt az általánosabb eszmét képviseli, hogy a természetnek egyetlen, mindent egységbe foglaló törvénykészlete van, mely egyetlen forrásból származik. Így a természetről beszélve a *lex* és *regula* szavakat használja. Míg a *lex* a felsőbbség megszabta törvényt jelentette, a *regula* (szabály) irányelv vagy szabvány volt, amelyhez a dolgokat mérni lehetett, és ebből a jelentésből alakult ki ez a kifejezésünk: „szabály szerint", ami azt jelenti: „általában". A két kifejezés jelentése később kettéágazott: a *lex* idővel a dolgokban benne rejlő valamit jelentette, ami miatt sajátos módon viselkednek, a *regulá*ból pedig szabályszerűség lett, események vagy természeti jelenségek sorozatának tulajdonsága. Bacon számára a fénnyel kapcsolatos törvények a természet szabályszerűségei voltak, nem pedig isteni parancsok.

Az a teologikusabb jellegű nézet, mely szerint a természeti törvények isteni kikötések,* szembetűnőbben jelentkezik a csillagászok körében, akik nem befolyásolják a természetet értesülések szerzése céljából, hanem az égboltot bámulják. Tycho Brahe (1546–1601) odáig ment, hogy azt állította: „az égi mozgások csodás és örök törvényei, amelyek oly szerteágazóak és mégis oly harmonikusak, Isten létét bizonyítják." A természetben található szabályszerűségek jeleinek és a természet egységét szavatoló égi Törvényhozó bibliai fogalmának hasonló összeolvadását fogadta el Descartes és Kepler is. E kutatók

*Érdekes felidézni azt az Aquinói Tamás által kiválóan képviselt középkori nézetet, amely az arisztotelészi belső hajlandóságokat a természet gondviselésszerűen Isten szolgálatában álló oldalainak tartotta. Ebben a közös vállalkozásban azonban alapvető szerepük sérthetetlen volt. A szóban forgó nézet szerint Isten viszonya a természettel egyenrangú viszony, nem pedig uralkodói, mint a mechanikus világnézetben, mely szerint a természeti törvények kívülről rendeltetnek el. Miután Étienne Tempier párizsi püspök 1277-ben néhány arisztotelészi nézetet megbélyegzett, az utóbbi felfogás érvényesült. Arisztotelésznek azokat az elképzeléseit kárhoztatta, amelyek korlátozni látszottak Isten szabad választási lehetőségét a világegyetem igazgatásában – például a világegyetem egyenes vonalú mozgására vonatkozó tilalom vagy az üres tér teremtése –, és megnyitották az utat a maguktól érvényesülő természeti törvények mechanisztikus doktrínája előtt. Pár száz év múlva ezt a nézetet találták vonzónak a református teológusok, mint például Luther és Kálvin, akik kiváltképpen hangsúlyozták Isten szuverenitását, és hittek az általa elrendelt események hajlíthatatlan predesztinációjában. A reformátorok úgy hitték, hogy a dolgok mozgását az anyag semmilyen belső hajlandósága nem határozhatja meg: azt csak Isten rendelheti el, és a természeti törvények ennek a zsarnoki irányításnak a kifejeződései.

azonban fokozatosan ráébredtek, hogy nincs különösebb szükségük a természetben látható szabályszerűségek eredetét firtató nézetekre: feltéve persze, hogy hittek e szabályszerűségek létezésében, megfigyeléseket végezve és matematikai formában összefoglalva őket, tudományfilozófia nélkül is haladást tudtak elérni. Keplert és Kopernikuszt, miután bepillantást nyertek a világban rejlő szabályszerűségekbe, a további felfedezések vágya hajtotta, nem pedig az, hogy értelmezzék vagy valamilyen tudományon kívüli filozófia alátámasztására használják fel ezeket az összefüggéseket. A tudomány jelentése és módszere külön úton kezdett járni.

Kepler (1571–1630) egyike volt az első tudósoknak, akik engedték, hogy gondolkodásukat a természetben rejlő egyszerűségbe és harmóniába vetett hit vezesse a természeti törvények felé. Elkötelezett realistaként abban hitt, hogy Isten a világegyetemet bizonyos őstípusok felhasználásával alkotta, amelyek az ember elméjében is megvannak, hiszen őt Isten a saját hasonlatosságára teremtette. Ez pedig azt jelenti, hogy az embernek ésszerű abban reménykednie, hogy megérti a természetet.

Kepler elfogadhatatlannak találta azt a gondolatot, hogy az általa és mások által felfedezett természeti törvények csak hasznos, ideiglenes leírások, végső igazságtartalom nélkül. Szerinte ebben az értelemben a természeti törvényeknek nem létezhetnek különböző, de egyenértékű megfogalmazásai. Ha elég hosszasan vizsgáljuk és elegendő számú megfigyeléssel hasonlítjuk össze őket, egy kivételével valamennyi legalább egy lényeges pontban ellentmond a megfigyeléseknek. Így az úgynevezett egyenértékű megfogalmazások közül egy és csak egy a helyes. Bár Kepler *a posteriori*, a tények alapján fogalmazta meg törvényeit, úgy hitte, hogy *a priori* is levezethetők lettek volna.

A természeti törvények matematikai egyenletekkel való kifejezése is Keplernek tulajdonítható. E kifejezésmód olyannyira sikeresnek bizonyult, hogy később *modus operandi* lett a tudományban: a valódi természeti törvények most már kivétel nélkül matematikai törvények. A középkori nézet azzal kezdődött, amikor a fizikai eseményeket szimbolikusnak tekintették, és azzal ért véget, amikor az események helyébe matematikai szimbólumok léptek. Ezek a szimbólumok egyetemesek voltak. Lehetővé tették, hogy a tudomány különböző helyeken fejlődjék, és eredményeit egyértelműen közölhesse. A dolgokat többé nem tekintették megmagyarázottnak akkor, ha teleologikus céljukat feltárták: csak akkor volt elfogadható a magyarázat, ha sikerült egyetlen matematikai egyenletrendszerbe sűríteni. Idővel ez vált a tudományos magyarázat kimondatlan definíciójává.

A matematikai törvényeknek a megfigyelési adatokon alapuló, Kepler általi megfogalmazása nem volt teljesen kielégítő. A bolygómozgásról alkotott első

törvénye kimondta, hogy a bolygók elliptikus pályán mozognak, de egy ilyenfajta törvény nem teszi lehetővé, hogy jelenlegi helyzetének ismerete alapján megjósoljuk, hol lesz az adott bolygó egy meghatározott jövőben. Ennek eléréséhez Kepler csillagászati leírását hatékonyabb matematikai módszerrel kellett párosítani. Az első lépéseket ebben az irányban Kepler kiváló levelezőtársa, Galileo Galilei (1564–1642) tette meg Pisában.

Galilei nem elégedett meg a természeti törvényeknek a megfigyelésekből való levezetésével, hanem nekifogott, hogy befolyásolja a természetet, s hogy nyilvánvalóvá tegye a természeti törvényeket. Annak érdekében, hogy a testek nehézkedés hatására történő esésének árnyalatait is észlelhesse, lejtőkön gurította le őket, úgyhogy a hatások lelassultak, és tanulmányozhatóvá váltak. Feltevéseit nagy hozzáértéssel alkotta meg és tette próbára, és a természet rendszeres kísérleti vallatása útján fokozatosan kifejlesztette a mozgások matematikai leírását. Kimutatta, hogy Arisztotelész mozgástörvényei nem felelnek meg a kísérleti adatoknak. Ezt ugyan Arisztotelész is felfedezhette volna, de Galilei azt is meg tudta tenni, amire Arisztotelész sohasem lett volna képes rávenni magát: „gondolatkísérletet" agyalt ki, melyben a testek ellenállás nélkül (vákuumban!) zuhantak. A vákuum emez idealizálása révén a mozgás jelenségének lényeges vonásait elválasztotta a lényegtelenektől. A képzeletbeli gondolatkísérletek megszerkesztésének ez a szokása mutatja, mennyire az új tudományos módszer sugallta a tudományos kérdések eldöntésének új módját. E lépések eredménye a világon először egy egységes fizika volt, melyet minden természeti jelenségre alkalmaztak. Ez volt az első korszerűnek „látszó" és érezhető tudomány. A mögötte rejlő módszertan teljesen különbözött a korábbi természetfilozófiáétól, Herbert Dingle szerint:

> az önuralom – önmaga önkéntes korlátozása a tudás kiterjesztésére kifelé, a megfigyeltből kiindulva a nem megfigyelt felé, ahelyett, hogy képzelt egyetemes elveket erőltetne befelé, a megfigyelt világra –, igen, ez fémjelzi a tudóst, ez különbözteti meg legalapvetőbben a tudományfilozófustól.

Miután ezt, és oly sok mást is elért, Galilei még valami kimondottan mai dolgot is tett: nekilátott „népszerű" beszámolókat írni felfedezéseiről a nagyközönség számára.

Newton, követői és a newtonianizmus

> Newtont nagyon kevés ember olvasta, hiszen megértése tanult főket feltételez. Beszélni viszont mindenki beszél róla.
>
> Voltaire

A természeti törvényekről alkotott elképzeléseink előrehaladásában a legkáprázatosabb fejlemény Isaac Newton (1642–1727) működése volt. Az ő hozzájárulása a természet ismeretéhez a legnagyobb, amit egy ember egymaga valaha is tett, de személye nemcsak ezért érdekes a mi történetünk szempontjából. Röviddel előtte élt más kiváló tudósokkal ellentétben az ő munkássága meghatározó hatással volt egy egész kultúrára. Lángesze nem találkozott olyan rosszallással és üldözéssel, mint a szókimondó és szilaj Galilei, csak az elsőbbségről folytatott állandó, személyes viták zavarták, először Hooke-kal, majd később Leibnizcel. Munkája egy teljes természetfilozófiát teremtett, és elindította a tudománynak a nagyközönség körében való népszerűsítését angol nyelven. Az egyház, a királynő és a kormány kegyeivel elhalmozott Newton kiválósága lett az a középpont, amely körül a Royal Society visszanyerte megfakult tudományos érdemeit és szellemi hírnevét.

Newton kedvező időpontban érkezett. Kopernikusz és követői a tudományt olyan irányba indították, ahol már nem az ember volt a dolgok középpontjában. Galilei olyan fokra fejlesztette a matematikai módszert, hogy most már voltak jól feltett kérdések. A közlemények és a születőben lévő tudományos társaságok elősegítették a vélemények és adatok cseréjét. A tudomány társadalmi megbecsülése gazdag és befolyásos pártfogókat vonzott. A tétlen megfigyelés helyett a tevékeny kísérletezés bevezetése hozzáértő mesterembereket ösztökélt a tudományos vállalkozáshoz való csatlakozásra. Műszereket terveztek és építettek abból az egyedüli célból, hogy a világot kimerítőbb részletességgel figyelhessék meg. Az, amit a mikroszkóp és a teleszkóp feltárt, határtalanul feltüzelte a kíváncsiságot.

Míg a reneszánsz gyakorlati géniusza, például Leonardo da Vinci fölöttébb változatos érdeklődésű volt, és mindent, amit látott, katalogizált és példákkal szemléltetett, Newton számos dologra mély, egységesítő megértéssel tekintett. Mindig felismerte a felszínesen különböző jelenségeket összekapcsoló lényeges közös tényezőt, és ennek eredményeképp a továbbiakban a természet matematikai szabályszerűségeit, nem pedig furcsaságait hangsúlyozta. Céltudatosságának köszönhetően mély értelmű természeti törvények egész sorát volt képes megalkotni, amely ma mint a fénysebességnél sokkal kisebb sebességgel mozgó tárgyak viselkedésének kitűnő megközelítése él tovább. A világ newtoni

elmélete olyannyira sikeres volt, hogy a realizmus új erőre kapott. Széles körben hitték, hogy Newton rátalált a Teremtő végső törvényeire.

Newton világosan látta, hogy a skolasztikusok szőrszálhasogatásával megtámogatott arisztotelészi hagyomány terméketlen, olyan érvelés a dolgok benső, rejtett tulajdonságairól, amely e tulajdonságok okát maguknak a dolgoknak a sajátos belső törekvésében kereste. Newton általános szabályokat akart azonosítani, amelyek meghatározzák, *hogyan* történnek a dolgok;* nem érdekelte az a megoldhatatlan kérdés, *miért* történnek, mert meg volt győződve arról, hogy a „miért" kérdésére való mindennemű utalás nélkül is meg lehet mondani, „hogyan". *Principia* c. műve bevezetésében azt írja, hogy a múlt filozófusai „a dolgok elnevezésével és nem kikutatásával voltak elfoglalva". A továbbiakban megalapoz egy tudományos módszert, mely ezt az egyensúlyhiányt hivatott helyrehozni. Erről a módszerről azt állítja: „ezeket az elveket nem okkult tulajdonságoknak tartom, melyek a dolgok sajátos formájából származnak, hanem a természet általános törvényeinek, amelyek által maguk a dolgok formálódnak."

Newton módszere nem volt teljességgel forradalmi, és bizonyosak lehetünk abban, hogy axiómáit először a felvetődő kérdések intuitív megoldása során alakította ki, és csak sokkal később fejtette ki őket. A helyes tudományfilozófia önmagában nem elégséges ahhoz, hogy valaki tudományos felfedezéseket tegyen. A newtoni mozgástörvények szemügyre vételének bevezetéseképpen vessünk egy pillantást René Descartes (1596–1650) törvényeire, aki néhány évvel Newton születése után távozott az élők sorából. E törvényeket 1644-ben „természeti szabályok" néven említette, 1647 után azonban a „természeti törvény" kifejezést használta. Ezek „matematikai"-nak látszanak, a megfigye-

*Ez ellentétes a hagyományos arisztotelészi nézettel, mely szerint az anyagot belső törekvései irányítják, nem pedig kívülről fölérendelt törvények. 1693-ban Newton nyíltan kifejtette ezt a gondolatát Richard Bentleynek írva: „Hogy a gravitáció az anyag veleszületett, inherens és lényegi tulajdonsága ... számomra oly nagy képtelenségnek tűnik, hogy úgy hiszem, nincs ember, aki elfogadja, ha megfelelően jártas a filozófiai gondolkodásban" (Ford. Fehér Márta). Úgy látta, hogy ezeket a külső törvényeket közvetlenül és teljes mértékben Isten rendelte, éppen úgy, ahogy a társadalom törvényeket rendel az állampolgárok fölé. Emiatt vitába is bonyolódott Leibnizcel, aki azt az arisztotelészi nézetet hajtogatta, hogy az anyagnak veleszületett törekvései vannak, és ugyanezért állítja Samuel Clarke Leibnizcel folytatott levelezésében, hogy a newtoni világképben „nincsenek Istentől független természeti erők". Számunkra annyira ismerős az elrendelt törvények fogalma (akár Istent tartjuk törvényhozónak, akár nem), hogy könnyen elsiklunk afelett, hogy milyen típusú értelmi akadály állhatott e gondolat útjába. Egy olyan időszakban, amikor a vitalista nézetek különválasztották egymástól az élő és élettelen világot, és az embert elméje a természetben minden más fölé emelte, kellett volna elfogadniuk, hogy Isten törvényeit az élettelen tárgyak „megértik", és viszonyulnak hozzájuk, hasonlóan ahhoz, ahogyan az emberek viszonyulnak az erkölcsi és társadalmi törvényekhez.

lésből következnek, és tagadják a vég-okok bármilyen rendszerét. Mindazonáltal helytelenek. Bármilyen jó a tudós tudományos módszere, azért szükség van a világ *helyes* megfigyelésére is.

Úgy látszik, hogy a „mozgástörvény" kifejezés Descartes-nak, Huygensnek, Wallisnak és Wrennek az ütköző testek viselkedéséről szóló dolgozatai után vált közkeletűvé. A Descartes által javasolt törvény érdekes példa a helytelen mozgástörvényekre, amelyeket majd Newtoné vált fel. Descartes mozgástörvénye két részből áll, és két tömeg ütközésének eredményét jósolja meg:

> 1. *Ha két testnek azonos a tömege és a sebessége ütközés előtt, akkor az ütközésben mindkettő visszaverődik, és megtartja korábbi sebességét.*
>
> 2. *Ha két testnek nem azonos a tömege, akkor ütközéskor a könnyebbik test visszaverődik, és új sebessége egyenlő lesz a nehezebbikével. A nehezebbik test sebessége változatlan marad.*

Descartes mindkét törvényt látszólagos szimmetriák és amaz elképzelés alapján nyerte, hogy valaminek meg kell őrződnie az ütközés folyamatában. Indítványainak ugyanaz a hibája, mint Arisztotelész törvényeinek: a folytonosság hiánya. Erre először Leibniz mutatott rá.

Végezzünk el egyet a Galilei által oly divatossá tett „gondolatkísérletek" közül. Képzeljünk el egy sorozat különböző ütközést különböző tömeg-párok között, amelyek közelítsenek egyre jobban egy bizonyos tömeg-pár ütközéséhez. Ekkor az ütközések eredményének is egyre jobban közelítenie kellene ennek az egy tényleges példának az eredményéhez. Ezt a tulajdonságot *„folytonosság"*-nak nevezzük. Ha $E(A)$ valamely A ok hatását jelöli, akkor a folytonosság követelménye azt jelenti, hogy amint az A ok egyre közelebb kerül valamilyen másik B okhoz, úgy $E(A)$ is egyre közelebb kerül $E(B)$-hez. Világos, hogy Descartes mozgástörvényei nem rendelkeznek ezzel a tulajdonsággal. Ha $E(M)$ az első, M tömegű test sebessége ütközés után, és v a sebessége ütközés előtt, és a második test tömegét m-mel jelöljük, akkor Descartes második törvénye azt állítja, hogy

$$E(M) = v, \quad \text{ha } M > m \tag{2.5}$$

és

$$E(M) = -v, \quad \text{ha } m \leq M \tag{2.6}$$

Figyeljük most meg, hogy ha gondolatkísérlet-sorozatunkban először csökkentjük M értékét, úgy, hogy egyre közelebb kerüljön m értékéhez, majd utána m értékénél alacsonyabb kiindulási értékről növeljük, ellentmondást

tapasztalunk, mert (2.5) és (2.6) alapján v közelebb és közelebb jut $-v$-hez, ami csak akkor lehetséges, ha v egyenlő nullával! Csaknem azonos tömegű golyók közötti ütközések gondos megfigyelése fényt derített volna Descartes ütközési „törvényének" helytelenségére.

Newton a világot gondosabban, egyszersmind szélesebb körben figyelte meg, mint Descartes, és előnyére szolgáltak Descartes mély meglátásai is. A Newton által lefektetett mozgástörvények 1687-ben jelentek meg nyomtatásban, bár ennél már sokkal korábban kidolgozta őket. A mai tudósokkal ellentétben Newtonnak nem volt sürgős, hogy közölje vagy más módon nyilvánosságra hozza felfedezéseit. Sőt lehetséges, hogy írásainak zöme csak barátai ösztönzésére vált egyáltalán ismertté. Jogos a gyanú, hogy ha Newton hivatalos és nyilvános ellenállással került volna szembe, mint korábban Kopernikusz vagy Galilei, „prizmájával és hallgatag arcával" számos felfedezését magával vitte volna a sírba. Szerencsére nem így történt.

Newton a következőképpen fogalmazta meg három nagy jelentőségű mozgástörvényét:

> 1. *Minden test megtartja nyugalmi állapotát vagy egyenes vonalú egyenletes mozgását, amíg a rá ható erők következtében nem kényszerül állapotának megváltoztatására.*
>
> 2. *A mozgás megváltozása arányos a testre ható mozgató erővel, és annak az egyenesnek a mentén következik be, amelyben az erő hat.*
>
> 3. *A hatással mindig ellentétes és egyenlő nagyságú az ellenhatás; másképpen, két test kölcsönös hatása mindig egyenlő nagyságú és ellentétes irányú.*

A három állítás közül a legérdekesebb az első törvény. Az iskolában rendszerint ismerősebb megfogalmazásban találkozunk vele (Newton eredetileg latinul írt): „Az a test, amelyre nem hat semmilyen erő, nyugalomban marad vagy egyenletes sebességgel halad." Egy korábbi vázlatában először így fejezte ezt ki:

> Ha valami egyszer mozgásba lendül, sohasem áll meg, hacsak valamilyen külső ok nem akadályozza,

majd pedig így:

> Egy test egyedül belső ereje által mindig egyenletesen, egyenes vonalban halad, feltéve, hogy semmi nem akadályozza,

végül az utolsó előtti változat:

> Belső ereje folytán minden test megőrzi nyugalmi állapotát vagy egyenes vonalú egyenletes mozgását, hacsak a rá ható erők állapotának megváltoztatására nem kényszerítik.

Ez a törvény tulajdonképpen sokat köszönhetett Descartes-nak, aki elsőként szakított azzal az ókori elképzeléssel, hogy a mozgás valamiféle folyamat, és felismerte, hogy a nyugalmi állapot és az egyenletes mozgás milyen értelemben hasonló. 1644-ben híres műve, a *Principia Philosophiae* már tartalmazta Newton első törvényének elődjét:

> Ha [egy test] nyugalomban van, nem hisszük, hogy valaha is megmozdul, hacsak valamilyen [külső] ok nem kényszeríti erre. Hasonlóképpen, ha mozog, miért is gondolnánk, hogy valaha is saját magától, semmi mástól nem korlátozva, megszakítaná mozgását.

Newton következtetései különböznek Descartes-éitól abban, ahogyan levonta őket: sok különféle kísérletből és megfigyelésből. Alátámasztásukra lövedékek és bolygók mozgását hozza fel. Messzebbre is mennek, mert Newton felismerte, hogy valahányszor a mozgás nem egyenletessé válik, akkor valamilyen erő hat. Az egyetemesség elemét is bevezeti, az első mondatban így fogalmazva: „Minden test..." Észre kell vennünk a szándékos ellentétet Descartes *Principia Philosophiae* c. művével, amikor Newton nagy művének a *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* címet adja.

Newton első törvénye azt állítja, hogy amikor nincs erőhatás, nincsen gyorsulás. Ha egy változó sebességgel vagy nem egyenes vonalú pályán haladó testet látunk, akkor az arra ható erők eredője nem nulla. Emlékezzünk csak, mennyire más volt Arisztotelész mozgástörvénye (2.1), ő ugyanis azt állította, hogy az erőhatás a Földön *nem gyorsuló mozgást* okoz, és azt is fenntartotta (de csak filozófiai okból), hogy az égitestek természetes mozgása körmozgás. Arisztotelész égi világában a körmozgás, nem pedig az egyenes vonalú mozgás a természetes állapot, a földi világban pedig a tárgyak természetes mozgási állapota a nyugalom. Newton azt mondta volna Arisztotelésznek, hogy az erő a gyorsulás „ható-oka".

Newton figyelemreméltó állításában az az érdekes, hogy sem ő, sem Descartes, sem senki más nem látott soha olyan testet, amelyre *semmilyen* erő nem hat. Mindenre hat a világegyetemben lévő többi test által kifejtett tömegvonzás, és bármilyen tényleges helyzetben egy test általában sokféle más, elkerülhetetlen erő hatásának is ki van téve. Nincs ismert módszer arra, hogy

a testeket minden erőhatástól elszigeteljük. Nem tudjuk csak úgy kikapcsolni a természet erőit. Ha jól meggondoljuk, közöttük vannak azok az erők is, amelyek a szilárd testeket összetartják. Mindez azt jelenti, hogy Newton elődeinél sokkalta kifinomultabban járt el: nem pusztán csak a természetben látottakat írta le, hiszen első törvénye olyan helyzetet ábrázol, amilyet soha senki nem látott és nem is fog. Ez nem egy hamisítatlan realista felfedezése arról, milyen a világ, mert a világban nincsenek olyan tárgyak, melyek megfelelnének a törvény kikötéseinek, bár Newton igenis hitte, hogy a jelenségek mögött rejlő valóságot írja le, nem csak „megóvja a látszatot". És nem is operacionális állítás: nem azt mondja meg, hogyan kell erőt vagy sebességet mérni. A platóni idealisták szelleméhez áll legközelebb. Newton egy ideális helyzetet mérlegel, melyet nagyszámú nem ideális helyzet megfigyelése alapján képzelt el. A mai fizikusok ezt „modellnek" neveznék. A körülményeket igen nagy mértékben ahhoz igazította, ahol egy testre ellentétes erők hatnak, de ezek majdnem kiegyenlítik egymást, és igen jó megközelítésben a testre nem hat eredő erő. Első törvénye az elme szüleménye ebben a látványos értelemben, olyan absztrakció, amely megragadja a valóság lényeges elemeit. Benne rejlik annak megérzése, hogy mi az összes hatóerő, s hogy mindet egyformán figyelembe kell venni.

A későbbiekben a tudósok gyakran követték ezt az utat. A jó természeti törvények megfogalmazásának művészete abban áll, hogy fel kell ismerni: a helyzet mely vonásai lényegtelenek. Egyetlen természeti törvény sem képes egy valós természeti jelenségben benne rejlő összes megfigyelhető tényezőt figyelembe venni. Ez túlságosan bonyolult. A hatékony tudóst ehelyett az fémjelzi, hogy a lényegtelen vonásokon át meglátja a lényegeset. A törvénynek azonban olyannak kell lennie, hogy akkor is igaz maradjon, ha leírásunkba a világ összes lényegtelen, elhanyagolt, másodlagos fontosságú vonását is belevesszük. Nem azért hanyagoljuk el ezeket, mert kínos ellenpéldák, hanem mert nem mutatnak rá új alapelvekre. Ha figyelembevételüknek az volna a következménye, hogy a levezetett törvény hamisnak bizonyul, akkor már nem lennének lényegtelenek.

A newtoni fizika fejlődésével új fogalmak jelentek meg: súrlódásmentes felszín, ideális gáz, tökéletes elektromos vezető, rugalmatlan ütközés, tökéletes szigetelő, tökéletes gömb és így tovább. Egyikük sem létezik a való világban, ám egy törvényt úgy lehet a leghasználhatóbban megfogalmazni, ha azt írja le, milyen volna az ilyen „ideális" tárgyak viselkedése, hogyha az eszményi esetet mind jobban és jobban megközelítő helyzetek folyamatos sorozatának határesete állna fenn. Így tehát a Descartes mozgástörvénye ellen oly hatásosan felhasznált folytonossági elvet arra használjuk fel, hogy a fizikai törvények

egyre általánosabb vetületeihez juthassunk el. Az ideális tárgyat a megfigyelhető tárgysorozatok határértékének tekintjük, nem pedig holmi más-világi tervrajznak. E megközelítés fenntartja a fizika és a filozófia Descartes által bevezetett különválasztását. Newton sohasem vett részt a platóni idealizmusról folytatott vitákban. Az ilyenfajta törvények lehetővé teszik, hogy a valóságos dolgok viselkedését az ideális viselkedéstől való eltérésük mértékével mérjük. Ahogy a leírni kívánt helyzet egyre jobban megközelíti a törvényünkben ábrázolt ideális helyzetet, azt várjuk, hogy a valódi helyzet viselkedése is egyre jobban megközelíti a törvényben foglaltakat. A gyakorlatban méréseink és megfigyeléseink nem lehetnek tökéletesen pontosak, és így nincs arra mód, hogy valaha is meggyőződhessünk arról: egy törvény *majdnem*, nem pedig *tökéletesen* igaz.

Newton második törvénye is sok-sok év alatt érte el jelenlegi formáját. Először így hangzott:

> A testnek abban az irányban kell mozognia, amerre tolják,

majd így:

> A mozgás megváltozása mindig arányos azzal az erővel, amely megváltoztatja,

végül utolsó előtti változatában:

> [Egy test] mozgási vagy nyugalmi állapotában bekövetkező változás arányos a hatóerővel, és annak az egyenesnek a mentén következik be, amelyben az erő hat.

Newton harmadik törvénye (a hatás egyenlő az ellenhatással) szintén érdekes elszakadás az ókori előítéletektől. Felismeri, hogy az erők a testek kölcsönhatásából erednek. Azt azonban nem lehet szubjektív módon eldönteni, hogy „valójában" mi is hat mire: az ajtó éppen annyira kopog a kezemen, mint amennyire én kopogok az ajtón. Sem a középkori ember, sem Arisztotelész követői nem juthattak volna ilyen demokratikus álláspontra. A kopogtató „célját", valamint az élettelen és az élő résztvevő közti különbséget sokkal fontosabbnak tartották volna. Newton nem tagadja, hogy ezek a tényezők léteznek, de felismeri, hogy lényegtelenek. A szándék és a cél kivonása a természettudományos megfontolásból a folyamatban lévő kopernikuszi forradalom része volt, amely az emberi és isteni dolgokat kivonta a tudományos módszer hatásköréből.

Newton harmadik törvényének a következő előzetes megfogalmazását ismerjük:

> Amennyire az egyik test hat a másikra, ugyanannyi ellenhatást tapasztal. Minden, ami valami mást nyom vagy húz, maga is egyenlő nyomást vagy húzást szenved el.

Newtont elsősorban az érdekelte, hogyan történnek a dolgok a természetben, nem pedig az arról szóló filozófiai viták, hogy miért vagy milyen végső cél érdekében történnek. Mindazonáltal ezeket a kérdéseket nem tekintette értelmetlennek vagy lényegtelennek, sőt idejének tekintélyes részét különös metafizikai és teológiai érdeklődésének kielégítésével töltötte.* Ezeket a dolgokat azonban olyan kérdéseknek tekintette, amelyekre a természet gondos megfigyeléséből és kísérleti vizsgálatából nem lehet választ kapni. Alkímiai és vallásos tárgyú írásaiból ítélve, melyek száma jelentősen meghaladta a tudományos tárgyakkal foglalkozókét, nyilvánvalóan hitt abban, hogy e kérdések némelyike más módszerekkel megválaszolható.

Newton jelentősen leszűkítette a természetfilozófusok célkitűzéseit, ami igen előnyös volt, mert először tudta érdeklődésüket a *megoldható* problémák birodalmára korlátozni. Célkitűzéseit ily módon leszűkítve képes volt azt a figyelemreméltó állítást tenni, hogy az elődei által olyannyira kedvelt spekulációkra – „hipotézisekre", ahogy nevezte – az ő vállalkozásához nincs szükség. Volt egy igen egyszerű módja annak, hogy kizárólag a tapasztalatból természeti törvényeket vagy tudományos elméleteket lehessen kikövetkeztetni: a kísérletezés. Ez a tudományos módszer az, amelyet ma is használunk. Annyira nyilvánvalónak látszik, hogy nehéz megértenünk, hogyan gondolhatta bárki is, valaha is másképp – pedig másképp gondolták. Az arisztotelészi hagyomány bátorította a megfigyelést, de a kísérletet nem. Amikor Galieli ellenfelei a távcsövével végzett megfigyelések bizonyítékával szembesültek, eleinte azt hajtogatták, hogy a valóságnak a lencsék és más megfigyelő műszerek által előidézett torzulása miatt e megfigyelések megbízhatatlanok. A régiek számára idegen volt az a gondolat, hogy tudásszerzés céljából befolyásolják az eseményeket. Ez a beállítódás Európában a mesteremberek és mérnökök, valamint legalább ugyanilyen mértékben a természetfilozófusok hatására terjedt el.

*Mulatságos elgondolkodni azon, vajon miért nem gúnyolja ki senki Newtont azért, mert kiszámította és közölte: a világ teremtése i. e. 3988-ban történt, kivált ha tekintetbe vesszük, hogy James Ussher püspök (Newton kortársa) még mindig gúny tárgya az i. e. 4004-i dátummal!

Newton számára módszerei lehetővé tették, hogy a jelenségek viselkedését irányított kísérletek segítségével kutassa, s hogy ötleteit rendszeres módon próbára tehesse. Számos kortársa kételkedett abban, hogy a dolgok természetét egy mindent felölelő filozófiai elv helyett a gyakorlati tapasztalat szolgáltatta adatokból lehet meghatározni. Kétségeik nem voltak teljesen alaptalanok. A dolgok céljáról alkotott klasszikus elképzeléseknek megfelelően úgy hitték, hogy a megfigyeléseknek nincs egyedüli magyarázatuk. E nézet bátorította a szerteágazó okoskodást, és nem adott indítékot arra, hogy az egyetlen helyes megoldást próbálják meghatározni. Newton tulajdonképpen nem ellenezte az értelmezést és az okoskodást mint olyat, csak azokkal a gondolkodókkal helyezkedett szembe, akik a hipotéziseket mentségül használták arra, hogy ott se végezzenek valódi kísérleteket, ahol pedig lehetne. A „hipotézisekkel" szembeni ellenérzése annak az embernek a természetes berzenkedése volt, akinek sokkal különb műszer van a birtokában az igaznak a hamistól való megkülönböztetésére. Általános filozófiai állítások ettől kezdve nem emelkedhetnek a természeti törvény rangjára. Erre csak azok az állítások érdemesülnek, amelyek kiállták a nyilvánvaló tapasztalati tényekkel való kísérleti összehasonlítás próbáját. Newton teljessé tette a tudomány jelentésének és módszerének szétválasztását.

A newtoni tudomány és a „hipotézisek" megkülönböztetését világosan körvonalazta második nagy újítása: a matematika felhasználása. Ez a módszer teremtett új lehetőségeket a kísérleti ellenőrzés számára. A newtoni fizika matematikai fizika volt. Newton minden vizsgálódásában matematikai nyelven igyekezett kifejezni a természeti törvényeket, hogy teljesen egyértelműek legyenek. Ha a megfelelő matematika még nem létezett, ő maga fejlesztette ki. Így a valaha feltalált legfontosabb matematikai eszközök a fizikusok fegyvertárában jelentek meg. A leghatékonyabb a differenciál- és integrálszámítás volt, amelynek segítségével a matematika le tudta írni a folyamatos változásokat. A kiinduló helyzet ismeretében megjósolható a jövő vagy rekonstruálható a múlt. Ez a lépés a tudósoknak az általuk tanulmányozott világ végső természetéről való gondolkodásában teljessé tette a hangsúlyeltolódást.

Newton számos eredménye közül a gravitáció törvénye az, amelyik visszatekintve kiemelkedik a többi közül, és a természeti törvényekről való eljövendő gondolkodás szempontjából a legnagyobb jelentőségű. Ennek kidolgozásában jó hasznát vette Kepler és Huygens korábbi, az égitestek mozgásával kapcsolatos fontos felfedezéseinek. Az 1660-as évek közepén már megfogalmazódott benne egy ilyen törvény gondolata. Majdnem fél évszázaddal később így írt erről az alkotókorszakáról: „arra következtettem, hogy a

bolygókat pályájukon tartó erőknek fordítottan arányosnak kell lenniük attól a középponttól számított távolságukkal, amely körül keringenek." Newton gravitációs törvényének ez az első fellelt változata azonban egy kiadatlan, még címmel sem rendelkező kéziratban található, mely jelenleg *A körmozgásról* címet viseli, és feltehetően 1665-ben keletkezett. Halleyvel folytatott levelezésében ezt a művét idézte, bizonyítékként hivatkozva a kéziratra, hogy a fordított négyzetes összefüggés tekintetében megelőzte Hooke-ot. Kéziratában a huszonhárom éves Newton levezette a fordított négyzetes törvényt Keplernek a bolygómozgásról alkotott harmadik „törvényéből", valamint a körmozgás fenntartásához szükséges centripetális erő definíciójából, és arra a következtetésre jutott, hogy

> Mivel az elsődleges bolygóknál a Naptól mért távolságuk köbe fordítottan arányos az adott idő alatt megtett fordulatok számának négyzetével (Kepler harmadik törvénye): törekvésük a Naptól való eltávolodásra fordítottan arányos a Naptól mért távolság négyzetével.

Ez természetesen csak a *kör*mozgás sajátos esetében szemléltette a tételt. Később, a *Principia* I. könyvében ezt a nézetet a kúpszelettel leírható pályájú mozgás ott tárgyalt esetére általánosította. Sőt, a távolsággal való fordított arányosság nem minden: a gravitáció teljes törvénye tartalmazza az egymást vonzó testek tömegétől való, egyenesen arányos függést is. A végeredmény nagyon egyszerűen hangzik: ha adva van két, M és m tömegű test, amelyek középpontját a térben r távolság választja el egymástól, akkor F, a közöttük ható gravitációs vonzóerő arányos tömegeik szorzatával, fordítottan arányos a középpontjaikat elválasztó r távolság négyzetével, és a középpontokat összekötő egyenes mentén hat, azaz

$$F \propto Mm/r^2. \tag{2.7}$$

A *Principia* III. könyvében Newton leírja, hogy a gravitáció

> [a Nap és a bolygók] tartalmazta szilárd anyag mennyiségének mértékében hat, és hatását minden irányban óriási távolságba kibocsátja, mindig a távolság négyzetével arányosan csökkenve.

A természetre vonatkozó általánosításból következő további fontos elvi kérdés az volt, hogy a (2.7) képletben egy állandó értékű arányossági tényező van elrejtve. Annak ellenére, hogy a *Principiá*ban nem fordul elő, és egyértelműen csak Laplace írásaiban jelenik meg a XVIII. században, örökre úgy vált

MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA KÖNYVTÁRA

ismertté, mint a Newton-féle gravitációs állandó, amelyet Laplace *G*-vel jelölt, így tehát

$$F = GMm/r^2 \qquad (2.8)$$

Azzal, hogy ezt az állandót egy matematikai képletben bevezette, Newton hatalmas lépést tett előre. Azt állította, hogy minden test, akár égi az, akár földi, pontosan ugyanennek a természeti törvénynek engedelmeskedik. A gravitációs erőnek mind ugyanazt a belső erejét „érzik", függetlenül attól, mekkora a tömegük vagy távolságuk.

A gravitáció mindezen hatásainak egységbe foglalása révén így mégis Newton érdeme, hogy azonosította a „*G*"-t, amely az első *természeti állandó* egy természeti törvényben. Ma is ugyanez a rangja. Még ha 1915-ben Einstein általános relativitáselmélete magába olvasztotta is Newton elméletét a tömegvonzás erőiről, ez az új elmélet hasonló szerepben ugyancsak megtartotta Newton „állandóját", a *G*-t.

Mit értünk azon, hogy egy mennyiség *természeti állandó*? Azt, hogy nem függ az *M* és *m* tömegű testek milyenségétől, semmilyen fizikai tulajdonságuktól vagy más fizikai körülményektől – a mérés idejétől és helyétől, a laboratórium hőmérsékletétől és így tovább. Az efféle mennyiségek azonosítása a tudományt termékeny pályára állította, ami annak a szemléletnek a kialakulásában csúcsosodott ki, mely szerint a világegyetem szerkezetéről kialakított képünk tekintélyes része benne foglaltatik kisszámú és alapvető fontosságú természeti állandó számértékében, és ezek között még ma is ott található Newton *G*-je. E mennyiségek pontos, megfigyelt értékéből következnek világegyetemünk sajátos fizikai tulajdonságai. Egyelőre még nem tudjuk, hogy a természeti állandók pontos, számszerű értéke miért éppen annyi, amennyi. Erre a kérdésre még vissza fogunk térni a későbbi fejezetekben.

Az, hogy Newton a (2.8) egyenletben bevezette az univerzális gravitációs állandót, egy másik fontos kérdésre is ráirányítja a figyelmet. A tömegektől és a távolságoktól való arányos függés olyan viszony, melyet elemibb elvek alapján, elméleti meggondolásokkal is meghatározhatunk, az arányossági tényező értékét azonban csak megfigyeléssel ismerhetjük meg. A természeti törvények ilyetén felosztása mennyiségek (ebben az esetben erő, tömeg és távolság) közti függvénykapcsolatokra és univerzális arányossági tényezőkre a tudománynak ma is meglévő vonása, amelyre a későbbiekben még visszatérünk. Legyen elég itt annyit mondani, hogy a fizikusok célja a lehető legkisebbre szorítani elméleteikben azoknak a természeti állandóknak a számát, amelyek értékét végül megfigyelés útján kell meghatározni. Ezt a takarékosságra való törekvést annak kimutatásával próbálják megvalósítani, hogy a

korábban egymástól függetlennek gondolt természeti állandók tulajdonképpen vagy egymással, vagy még alapvetőbb változókkal állnak összefüggésben.

Az ókoriak szemében a világ élő szervezethez volt hasonlatos, Newton és követői szemében azonban egységes szerkezet volt – miként egy hatalmas óra belseje. Működése őseredeti: pontos, mechanikus és matematikai. Miután a Teremtő egyszer beindította, saját kérlelhetetlen belső logikájával halad tovább. Ahogy a skolasztikusok Istene az Omega volt, a Végső Ok, úgy Newton Istene az Alfa, minden dolgok megelőzően létező Első Oka. A világ determinisztikus voltába vetett erős hit sokat köszönhetett a kor vallásos gondolkodásának. Az a keresztény nézet, mely szerint az egy igaz Isten fektette le a természeti törvényeket, és „hatalmi szóval tartotta fenn őket", a természet ésszerűségébe, ellentmondás-mentességébe és előrejelezhetőségébe vetett erős hitet eredményezett. El kell azonban ismerni, hogy ezeket a törvényeket, legalábbis részben, azért keresték és találták meg, mert hittek a törvényhozó Istenség létében. Newtonnak Leibnizcel folytatott hosszadalmas vitája részben ezekkel a gondolatokkal volt kapcsolatos, melyeket Leibniz istenkáromlásnak tartott, mert nem adtak kellő teret az Istenségnek a természetbe való beavatkozáshoz a teremtés kezdeti aktusa után.

Newtonnak egy természeti jelenségről adott első általános jellegű leírását módszereinek követői mint a természet egyik alapvető törvényének felfedését üdvözölték – mint Isten egyik gondolatának újragondolását. Egy ilyen általános tulajdonság felfedezése támogatást nyújtott a vallásos apologétáknak, mint amilyen például William Whiston volt, aki szerint ez a teremtés egységessége és ennélfogva egyetlen Teremtő mellett tanúskodik. Mivel túlságosan figyelemreméltó ahhoz, hogy ne realista szellemben szemléljék, az óraszerkezethez hasonlítható, meghatározott matematikai elvek szerint működő világegyetem új, mechanikus paradigmájának fő rugójává vált. A tudomány olyan felfogását alapozta meg, amely azóta is jellemző az angol nyelvterület tudósaira: hajlamosak mindent szemléletes, mechanikus képre egyszerűsíteni. A kontinentális felfogás hagyományosan elvontabb volt, az érthetőséghez nem kívánta meg a bonyolult jelenségek mechanikai modellkénti elképzelését. Az elvont matematikai leírás elegendő volt. A szemléletes modellek iránti angol szenvedély mint pszichológiai vonás különösen bosszantotta volna Henri Poincarét a XX. század elején. Az elvont gondolkodás iránti francia igény kiváló képviselőjeként azt állította, hogy nem szükséges mindent az empirista angol tudósok által annyira imádott mechanikai analógiákra egyszerűsíteni. A mechanikai analógiáknak, mint bonyolult, elvont fizikai elképzelések magyarázatára szolgáló eszközöknek a szeretete olyan erény és bűn, amely még mindig uralja az angol nyelvű ismeretterjesztést. Sok tekintetben ez a newtoni stílus örök-

sége: nagy igazságok levezetése a világegyetem működéséről egyszerű mechanikai kísérletek felhasználásával, továbbá abba a paradigmába vetett hittel, hogy a természet valójában egy hatalmas gépezet – meg talán azzal a gyanúval, hogy Isten, csakúgy, mint Newton, angol!

Newtonnak a természet kutatásában alkalmazott megközelítése a világegyetem működésének megismeréséhez vezető utunkon a legnagyobb lépés volt, amelyet egyetlen ember valaha is tett. A hatalmas *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* kiadása 1687-ben, majd az *Optika* című műé 1704-ben (angol nyelven) azonban többet hozott, mint a tudományos gondolkodás forradalmát. Megváltoztatta a közönség gondolkodását is. A *Principia* volt az első tudományos „kultusz-könyv" (azaz olyan könyv, amelyről olvasnak, de amelyet nem olvasnak), és megteremtette azt, amit „newtonianizmusnak" nevezhetnénk. Ennek számos következménye közül az a legérdekesebb, hogy megkezdődött a tudomány rendszeres népszerűsítése a laikusoknak szánt, elemi szintű magyarázatok kiadásával. A XVIII. század első felében igen nagyszámú ilyen könyv látott napvilágot, hogy kielégítse a nagyközönségnek Newton és felfedezései iránti érdeklődését. A század első éveire Newton olymérvű köztiszteletre tett szert, amilyen sem azelőtt, sem azóta nem jutott angol tudósnak osztályrészéül: 1689-ben és 1701-ben a cambridge-i egyetem parlamenti képviselője volt; 1705-ben Anna királynő lovaggá ütötte, az első így megtisztelt tudós volt; mint „a korszak büszkesége" 1703-tól 1727-ben bekövetkezett haláláig a Royal Society elnöke volt, s ez idő nagy részében a Királyi Pénzverde első gondnokának tisztét is betöltötte, majd ezután, 1696-tól – példátlan egymásutániságban – Thomas Neale utóda a Királyi Pénzverde igazgatói tisztében. Figyelemre méltó, hogy ez az intézmény Newton gondnokságát megelőzően veszteségesen működött! A „körülvágás" (az ezüstérmék szélének körülnyírása), bár főbenjáró bűnnek számított, széles körű gyakorlatnak örvendett, és a pénzverde veszteségeinek fő oka volt, mert az teljes értékűre cserélte a megnyirbált érméket, és így tulajdonképpen ezüstöt ajándékozott a nagyközönség lelkiismeretlen tagjainak. Newton azzal vetett véget e visszaélésnek, hogy bevezette az érmék szélének recézését: ha a recézés az érme kerületén bárhol hiányzott, többé nem minősült törvényes fizetőeszköznek. A pénzverde azóta is megtartotta gyakorlatában ezt az újítást, ami kétszeresen is helyénvalóvá teszi, hogy 1978-tól egészen 1985-ben történt visszavonásáig Newton arcképe volt látható az angol egyfontos bankjegy hátoldalán (sajnálatos módon a mellette lévő *Principia* rosszul van megrajzolva: a Nap az elliptikus bolygópálya középpontjában van, nem pedig fókuszában!). Newtont jól megfizették a közszolgálatért: halálakor személyes vagyona összesen 32 ezer fontra rúgott, ami abban az időben hatalmas összegnek számított. Vagyona két

forrásból származott. A pénzverdétől tekintélyes fizetést, évi 600 fontot kapott, ám mint gondnok minden font érmévé vert ezüst után 1 shilling 5 és fél penny (kb. 7 és fél új penny) jutalékra is jogosult volt, és a pénzverők költségeinek kiegyenlítése után ennek maradéka még mindig több mint 1000 fonttal növelte évi jövedelmét.

Életének ez a közszolgálati része kormánykörökhöz közeli személyiséggé tette, és élete vége felé mind vele, mind általában a Royal Societyvel elkerülhetetlen módon számos szatirikus írás foglalkozott. Mégis, nem úgy, mint sok más lángész, Newton már életében tiszteletnek és megbecsülésnek örvendett kortársai körében, és megtisztelő, kitüntetett helyre temették, Chaucer és (az itt jelképesen nyugvó) Shakespeare mellé, a westminsteri apátságban. Newton és eredményei az egész XVIII. században elbűvölték a londoni társaságot. Kimagasló szellemiségével párosult tartózkodó viselkedése bizonyára egy más világ fényével vette körül alakját. Lenyűgözött európaiak érdeklődtek afelől, hogy vajon ugyanúgy étkezik és alszik-e, mint más halandók. Míg a múlt nagy elméi a világegyetem természetét illető nagyszerű következtetéseikhez bonyolult, kifinomult szóbeli érvelés útján jutottak el, Newton abban is újat hozott, hogy mély meglátásaihoz gyakran fölöttébb világias tárgyakkal végzett, igen egyszerű kísérletekkel jutott el: az optika törvényeinél egyszerű prizmával, a mozgástörvényeknél tárgyaknak (még talán almáknak is) a földre ejtésével kísérletezett. A nagyközönség nem értette ezeket a felfedezéseket (s ettől elragadtatása csak fokozódott; hasonló hatást ért el Einstein is, nem úgy, mint Darwin, akinek esetében a nagyközönség nagyon is jól értette, mit fedezett fel), de tudni akarta, mi is ez az új dolog, amit „newtonianizmusnak" neveznek.

Newton nézeteiről gyerekek számára is készültek népszerű beszámolók, például Newberry *A newtoni filozófiai rendszer ifjú urak és hölgyek számára átdolgozva* című műve (1761), valamint nők számára is, akiket akkor még nem tekintettek az igazi tanulásra képesnek. Az utóbbi kategóriában néhány csodálatosan képtelen írást találhatunk, mint például Francesco Algarotti gróf művét – *Sir Isaac Newton filozófiája hölgyek használatára* (1739) –, amelyet hat nyelvre fordítottak le, vagy Benjamin Martin tollából a *Fiatal urak és hölgyek filozófiáját* (1759). Ezek mellett az alacsony színvonalú népszerű beszámolók mellett igen magas szintű ismertető munkák is megjelentek vezető tudósok tollából más tudósok, illetve a művelt nagyközönség számára. A legkitűnőbb Colin Maclaurin könyve, a *Beszámoló Sir Isaac Newton filozófiai felfedezéseiről* (1748), amelynek szerzője kétségkívül a kor legkiválóbb angol tudósa és matematikusa volt. A kevésbé megbízhatóak között előfordulnak hóbortos könyvek is, mint *A világ newtoni rendszere, a legjobb kormányzási modell* John Desaguliers-től (1728), aki Newton módszereit válogatás nélkül próbálta

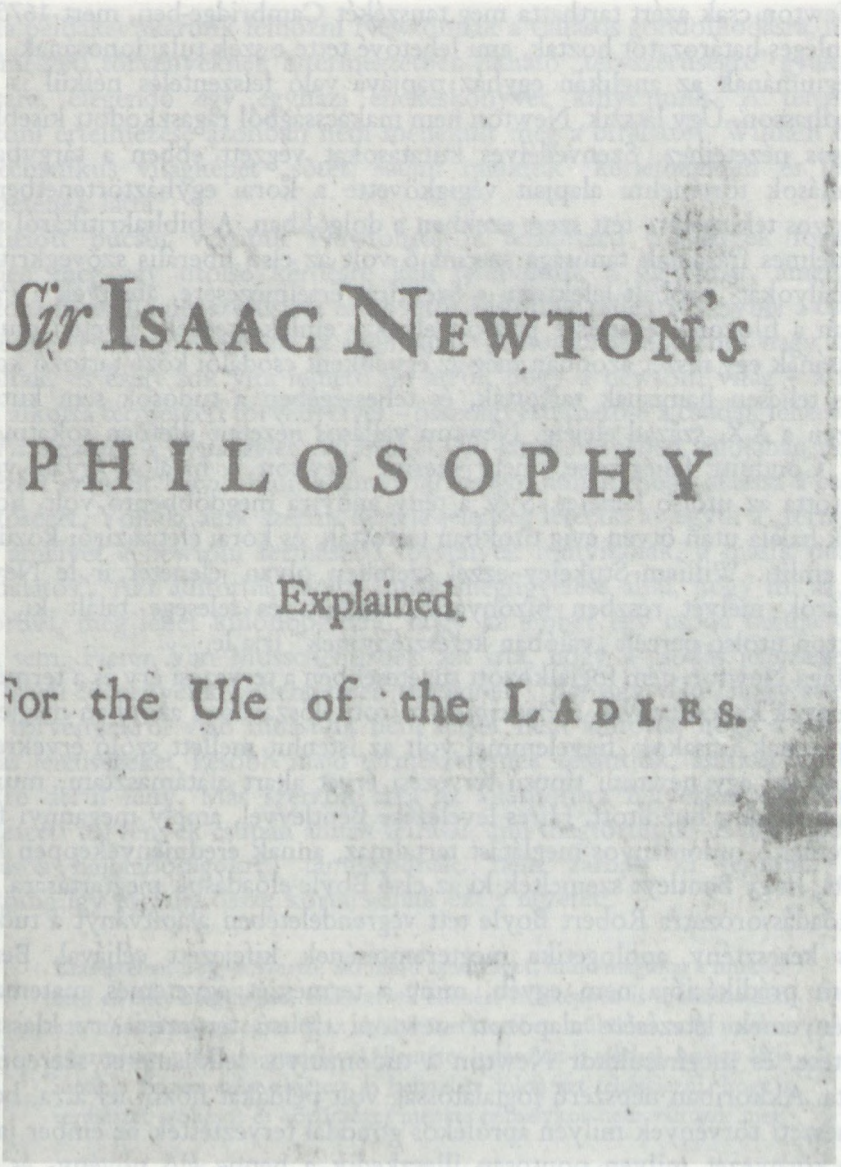
alkalmazni az élet minden területén. A newtoni természeti törvények és felfedezésük módja iránti csodálatot és széles körű figyelmet még egy további fontos tényező is tüzelte, amely egyesítette az értelmiségiek és a laikusok érdeklődését: a vallás.

Már beszéltünk arról, hogyan vezettek Arisztotelésznek a vég-okokról alkotott eszméi a természet antropocentrikus, teleologikus értelmezésének kialakulásához, mely szerint az ember minden jó dolgot úgy értelmezett maga körül, hogy azokat a gondviselés helyezte oda számára, nem pedig úgy, hogy csak véletlenszerűen használja őket. Newton munkája új lökést adott a hagyományos tervezési érvnek, mely szerint a természet működése olyannyira csodálatosan a mi előnyünkre van kitalálva, hogy csak egy mindent átfogó isteni terv része lehet. Míg a korábbi, kevésbé kifinomult tervezési érvek azt hozták fel, hogy a természeti jelenségek emberi használatra a legkedvezőbbek, és ezért isteni célról tanúskodnak, a newtoni tervezési érv magukat a természet *egyetemes törvényeit* hívta segítségül cáfolhatatlan bizonyítékul a természet tervszerű volta, és ezért a mögötte álló Tervező léte mellett. Az a realista nézet, mely szerint a newtoni törvények rendszere a világot olyannak írja le, amilyen az a valóságban (ezt a nézetet maga Newton nem védelmezte volna, mert a távolhatást ideiglenes dolognak tartotta), és nem csupán használható leírást ad, természetes módon egészítette ki azt a hitet, mely szerint a természeti törvények egy isteni törvényhozó rendeletei. Ezt az érvelést azután lelkesen meg is fordították: Newton óramű-világának órásra volt szüksége. A korábbi tervezési érvek természetesen szorosan kötődtek a „vég-okok" skolasztikus hagyományához, amely Newton korának reformáció utáni protestáns ortodoxiája számára az irtózat tárgya volt. Úgy tetszik, Newton – barátjával, Samuel Clarke-kal együtt – a Szentháromság és más alapvető keresztény dogmák tekintetében unitárius nézeteket vallott. Egy 1689-ben megszavazott parlamenti törvény eltiltotta az ilyen ariánus* nézeteket vallókat bizonyos akadémiai és közszolgálati hivatalok ellátásától.

*Arius a IV. században élt líbiai teológus volt, aki elvetette a Szentháromság tanát, amelynek elsődleges megalkotója Athanasius volt. Newton magánjellegű irataiból kiderül, hogy az egyháznak csaknem minden fő dogmáját megkérdőjelezte, és makacsul fenntartotta, hogy az eredeti Szentírást a IV. és V. század folyamán új részletek hozzáadásával meghamisították, amit kizárólag a Szentháromság kitalált tanának alátámasztása érdekében tettek. Newton szerint a kereszténység korábbi, hamisítatlan változata Ariustól ered, nem pedig Athanasiustól. A *Jelentős hamisítások a Szentírásban* című írásában fejti ki a korai egyháznak e megrontásáról alkotott, némileg paranoid elméleteit. Úgy látszik, hogy elsősorban Newton volt az, aki felkeltette az érdeklődést az eretnek ariánus tanok iránt, miután a korai keresztény egyház hitelvi zsinatai elítélték, és századokon át feledésbe merült.



2.2 ábra. A gravitációtól a levitációig: Newton egyik kortársának karikatúrája a gravitáció terén végzett munkájáról.


Sir ISAAC NEWTON's
PHILOSOPHY
Explained.
For the Uſe of the LADIES.

2.3 ábra. Francesco Algarotti gróf *Sir Isaac Newton filozófiája: magyarázat hölgyek számára* c. művének címoldala, amelyet Elizabeth Carter fordított angol nyelvre 1739-ben. A további kiadások 1742-ben, 1752-ben, 1765-ben és 1772-ben jelentek meg. Voltaire és kedvese ezt a népszerűsítést az ő ízlésük számára „túl komolytalannak" találta, „túl sok tréfával". Ennek ellenére hat nyelvre fordították le, és harminc kiadást ért meg, és lett így Newton fénnyel kapcsolatos gondolatai elterjesztésének fő eszköze az európai nagyközönség körében.

Newton csak azért tarthatta meg tanszékét Cambridge-ben, mert 1675-ben különleges határozatot hoztak, ami lehetővé tette e szék tulajdonosának, hogy kollégiumának az anglikán egyház papjává való felszentelés nélkül is tagja maradhasson. Úgy látszik, Newton nem makacsságból ragaszkodott kisebbségi vallásos nézeteihez. Szenvedélyes kutatásokat végzett ebben a tárgyban, a hitvallások történelmi alapjait végigkövette a korai egyháztörténetben, és bizonyos tekintélyre tett szert ezekben a dolgokban. A bibliakritikáról szóló terjedelmes írásainak tanúsága szerint ő volt az első liberális szövegkritikus. „Szabályokat" próbált lefektetni a Szentírás értelmezésére, amelyek a *Principiá*ban a filozófiai érvelésre javasolt elvekre emlékeztetnek. Ilyetén munkálkodásának egy részét azonban még az egyébként csodálói közé tartozó kortársai is teljesen hamisnak tartották, és teljességében a tudósok sem kutatták egészen a XX. század elejéig. Newton vallásos nézeteit illetően sokatmondó tény Conduitt feljegyzése, mely szerint Newton a halálos ágyán visszautasította az utolsó kenetet. S ez a tény annyira megdöbbentő volt, hogy a tanúk halála után ötven évig titokban tartották, és korai életrajzírói közül egy sem említi. William Stukeley ezzel szemben olyan jelenetet ír le Newton haláláról, melyet részben bizonyára Conduitt és felesége talált ki, mert Newton utolsó perceit „valóban keresztényinek" írja le.

Maga Newton nem foglalkozott tüzetesebben a tervezési érv és a természeti törvények kapcsolatával, a *Principiá*hoz írott előszavában azonban megjegyzi, hogy annak írásakor „figyelemmel volt az istenhit mellett szóló érvekre", és bárkit, aki egy newtoni típusú tervezési érvet akart alátámasztani, munkája felhasználására buzdított. Híres levelezése Bentleyvel, amely megannyi figyelemreméltó tudományos meglátást tartalmaz, annak eredményeképpen keletkezett, hogy Bentleyt szemelték ki az első Boyle-előadások megtartására. Erre az előadássorozatra Robert Boyle tett végrendeletében alapítványt a tudományos keresztény apologetika megteremtésének kifejezett céljával. Bentley három prédikációja nem egyéb, mint a természet egyetemes matematikai törvényeinek létezésére alapozott newtoni típusú tervezési érv klasszikus kifejtése, és megírásukkor Newton a tudományos lelkiismeret szerepét játszotta. Akkoriban népszerű foglalatosság volt példákat hozni fel arra, hogy a természeti törvények milyen aprólékos gonddal terveztettek az ember javára, és a környezet milyen pontosan illeszkedik a benne élő növény- és állatvilághoz. Ennek csak Darwin *A fajok eredete* című művének megjelenése vetett véget a XIX. század közepén, mely azután aláásta azt az állítást, hogy az élőlények és élőhelyük közti harmónia kizárólag tervezés eredménye lehet, jóllehet teljességgel figyelmen kívül hagyható a természeti törvényekből következő newtoni tervezési érv szempontjából.

Ha példákat akarunk felhozni Newtonnak a vallásos gondolkodásra, illetve a természeti törvényeknek a természetben látható „tervszerűségre" gyakorolt hatására, elegendő egy egyházi énekeskönyvet kinyitnunk. A természet newtoni értelmezése azonban nem menekült meg a bírálattól. William Blake a mechanikus világképet „sötét, sátáni malmok" kérlelhetetlen és lesújtó gépezetének látta.

Mielőtt búcsút veszünk Newtontól, a természeti törvények fogalmát illetően még egy utolsó kérdésre kell felhívnunk a figyelmet, amelyet a newtoni filozófia népszerűsítői és követői állítottak reflektorfénybe: a csodák kérdésére. Newton idejében az ilyenfajta vallásos problémákból nagy ügyet csináltak, és ezért sok vita lelhető fel arról, hogy a newtoni világ – a maga Isten alkotta természeti törvényeivel – összeegyeztethető-e a csodák lehetőségével. *Párbeszédek a természetes vallásról* (1779) című művében valójában pontosan ezért szentelt David Hume annyi fáradságot annak, hogy aláássa a csodák hihetőségét. Voltak, akik szerint kétféle jelenség létezik: az egyik a „természetes", amelyet a newtoni természeti törvények irányítanak, a másik pedig a „csodálatos". Azt állították, hogy annak megfigyelése által, hogy mi az, ami előfordul, meg lehet különböztetni, hogy az ember egy csoda tanúja volt-e vagy sem. Pieter Van Musschenbroek azt írta, hogy a csodás jelenségek „a természeti törvényekkel ellentétesen történnek". Bár úgy vélte, hogy a természeti törvényekről való tudásunk nem teljes, nem állította, hogy a látszólag csodás jelenségeket később majd természetesnek tekintjük, amikor új törvényekre derül fény. Más szerzők arra az álláspontra helyezkedtek, hogy a természeti törvények csupán annak leírásai, ami megtörténik, és bár bizonyos szokásos hajlandóságokról tanúskodnak, nem zárnak ki semmit. John Rowning így foglalja össze kortársainak ezt a nézetét:

> Kétségtelen, hogy a Szerző, aki mind az anyagot, mind magukat a működtető elveket megalkotta, emez elvek ellenére másképpen is működtetheti azt, mint ahogyan egyedül az elvek következtében működne, s ily módon a természet szokásos menetével ellentétes hatásokat is elérhet, ha úgy látja jónak... Éppen ezért elsietett és helytelen dolog azt feltételezni, hogy a természet szokásos és közönséges menete némelykor nem változik meg.

A Newton korát közvetlenül követő időben azt látjuk, hogy a „természeti törvény" kifejezést nyíltan használják különböző írásokban, eleinte általában a nagystílű newtoni meghatározás értelmében, és széles körben beépítik a vallásos apologetikákba. Mégis fennmarad egy ellentmondás: vonzó dolog az egyetemes természeti törvényeket isteni rendelkezésnek tekinteni, ám akkor e törvények Isten helyébe léphetnek. Newton előre látta ezeket a dilemmákat,

és Cotesnak a *Principia* második kiadásához írott előszavában a következő kijelentést találjuk bizonyos természeti törvények szükségessége és az isteni választás közötti ellentmondásról:

> Kétségtelen, hogy ez a világ, amely olyannyira bővelkedik a formák és mozgások változatosságában, semmi másból nem eredhetett, mint a mindent irányító és mindenek felett uralkodó Isten tökéletesen szabad akaratából.
>
> Ebből a kútfőből fakadtak mindazok a törvények, amelyeket természeti törvényeknek nevezünk, és amelyekben a legbölcsebb elgondolásnak valóban sok nyoma van, ám a szükségességnek a leghalványabb árnya sem lelhető fel... Aki elég öntelt ahhoz, hogy azt gondolja: a fizika valódi elveit és a természetes dolgok törvényeit egyedül saját elméjének erejével és saját értelmének fényével meg tudja találni, az vagy azt hiszi, hogy a világ szükségszerűen létezik, és a törvények ugyanebből a szükségszerűségből következnek; vagy ha a természet rendjét Isten akarata teremtette meg, akkor azt hiszi, hogy ő maga, a nyomorult féreg, megmondhatja, miként volt a legjobb csinálni. Minden igaz és józan filozófia a dolgok látszatára épül..., az emberek csodának vagy okkult tulajdonságnak nevezhetik őket, de a rosszhiszeműen adott neveknek a dolgok számára kellene hátrányt jelenteniük, hacsak ugyanezek az emberek azt nem mondják a végén, hogy minden filozófiának ateizmusban kellene gyökereznie.

A világ ésszerűsége

> Így nem mond semmit a világról..., hogy a newtoni mechanika segítségével leírható, míg az már igen, hogy *úgy* írható le általa, mint ahogy ennek esete valójában fennáll.
>
> Ludwig Wittgenstein
> (Ford. Márkus György)

A XVIII. század végére a tervezési érvek az ortodox vallásos gondolkodás részévé váltak Angliában; ám voltak, akik hathatós ellenérveket kezdtek felhozni, amelyekben benne foglaltatott az új tudományos vállalkozás ésszerűségének kritikája is. Ennek az orvlövészkedésnek két figyelemreméltó mestere volt, akiket ma – joggal vagy jog nélkül – az ókoriak óta a legfontosabb filozófusok közé sorolnak, bár saját korukban lényegében semmi hatásuk nem volt Angliában.

Sem David Hume, sem Immanuel Kant nem értett egyet a tervezési érv logikai alapjával. *Párbeszédek a természetes vallásról* című híres művében Hume

ezt különösen Newtonnal társítja, bár sokkal régebbi fogalom volt, és idézi az erről szóló állítást Maclaurinnak Newton munkáját népszerűsítő művéből. Cseppnyi gúnnyal így utal rá: „a vallásos hipotézis." Világos, hogy Newton követői kimondottan realista álláspontra helyezkedtek az általuk felfedezett természeti törvényeket illetően. Eszerint a világ valóban a Newton leírta pontos matematikai szabályoknak engedelmeskedő szerkezet volt (Newton idealizálásainak nem tulajdonítottak különösebb jelentőséget). Hume nem fogadta el azt, hogy a világegyetem törvényszerűségének létezik egy kitüntetett értelmezése, még ha meggyőznék is arról, hogy az valóban törvényszerű. Hume azt sem fogadta el, hogy a világegyetemről kimutatták, hogy gépezet, nem pedig, mondjuk, szervezet. Nem tekintette magától értetődőnek az ok és okozat közti logikai kapcsolatot sem, mint Newton. Ezek a gondolatok Hume *Párbeszédek* c. művében láttak napvilágot, amelyet ismeretlen kiadó adott ki, valószínűleg Edinburgh-ban, három évvel Hume 1776-ban bekövetkezett halála után. Amellett, hogy jelentős ellenérzést keltettek, a *Párbeszédek* arra ösztönözték Immanuel Kant német filozófust (1724–1804), hogy szigorúbb vizsgálatnak vesse alá azt, amit ma ismeretelméletnek neveznénk.

Kant munkája valójában megkérdőjelezte a természet newtoni törvényeinek realista értelmezését, amelyet korábban, a tudomány és a csillagászat területére tett kalandozásai során ő maga is kritika nélkül elfogadott. Mint oly sokan abban a korban, ő is azt hitte, hogy a mechanika és a gravitáció newtoni törvényei a mozgást és a gravitációt leíró, logikailag egyedül lehetséges természeti törvények. Egyik korai dolgozatában a fordított négyzetes összefüggést annak bizonyítására használta fel, hogy a térnek ennélfogva háromdimenziósnak kell lennie. Úgy látszik azonban, hogy később elvesztette a realista nézetbe vetett hitét, és – Hume írásai által felébresztve „dogmatikus szendergéséből" – a tudományos módszer gyökereit célba vevő kritika-sorozatba kezdett.

Kant úgy érvelt, hogy a valós világról egyedül az értelem segélyével nem lehetséges semmilyen állítást bizonyítani vagy megcáfolni. Kikerülhetetlen szűrők állnak a dolgok valósága és aközött, ahogyan észleljük és megértjük őket. Ezek a „kategóriák", ahogy ismertté váltak, megkerülhetetlenek; szükség van rájuk a megértés folyamatához, és rendet teremtenek ott, ahol nincs. A dolgok magukban függetlenek lehetnek az elmétől, de bármilyen rend, amelyet észlelünk, szükségszerűen az elme szüleménye. Felismerhetjük, hogy ez az előző fejezetben részletezett idealista álláspont alapja, és hasonlóak a gyenge pontjai is. Kant annak bizonyítására használta, hogy az általunk előtalált természeti törvények elkerülhetetlenül saját elménk szüleményei és következésképp ugyanez érvényes minden nagyszabású metafizikai következtetésre a

természetben látható tervszerűségről, amelyre belőlük következtethetünk. (Kant mellesleg rendkívüli mértékben rokonszenvezett a tervezési érvvel, amelyet más okokból talált meggyőzőnek. Csak azt akarta kimutatni, hogy egyedül észérvekkel sem nem bizonyítható, sem nem cáfolható.) Amint említettük, Kant abban is hitt, hogy a tudósoknak abban a hiszemben kellene munkálkodniuk, hogy a világ célszerűen berendezett, mert ez a lehető leghatékonyabb hozzáállás. Eszméi bizonyos tekintetben Platónhoz térnek vissza. Platón ideális formáit úgy tekinthetjük, mint a természet valóságát, amelyet az általunk végzett megfigyelések és a matematikai leírásra tett kísérletek azzá a tökéletlen változattá torzítanak, amelyről mi tévesen azt állítjuk: ez a valóság. Az idealizmusnak ezt a válfaját erélyesen támogatta Jeans és Eddington századunk háború előtti időszakában. Eszerint a világról tett megfigyeléseink elsősorban gondolkodásunk kategóriáiról vallanak.

Kantnak a tudománnyal kapcsolatos eszméiről az ifjú Heinrich Hertz készítette 1900-ban a legfontosabb tanulmányt. Kantnál tisztábban rajzolta meg a magukban való, meg nem figyelt tárgyak, róluk nyert érzéki észleleteink és róluk készített leírásaink közti különbségeket és viszonyokat.

A gyakorlatban úgy járunk el, hogy gondolati képet vagy matematikai képletet alkotunk a természetben látott tárgyak megjelenítésére. Ezeket a képeket úgy választjuk meg, hogy csak egyetlen szükséges tulajdonságuk legyen: az, hogy egy dolog valamely gondolati képének mindig ugyanaz legyen az eredménye, mint magának a dolog következményének a gondolati képe. Tehát ha valamely *P* jelenség hatását *E(P)*-vel, *P*-ről alkotott gondolati képünket pedig *I[P]*-vel jelöljük, akkor azt a feltételt szabjuk, hogy *I[E(P)]* legyen azonos *E(I[P])*-vel. A kanti gondolkodási kategóriák, amelyeket arra használunk, hogy eligazodjunk a világban, rendelkeznek ezzel a tulajdonsággal, amelyet *felcserélhetőségnek (reciprocitásnak)* fogunk nevezni. Nincs rá mód, hogy megtudhassuk: a természetről készített tudományos leírásaink összhangban állnak-e ezekkel, a felcserélhetőség tulajdonságán túlmenően. Newton rájött arra, hogy nincs is szükség egyéb megfelelésre annak eldöntéséhez, hogy „hogyan" viselkednek a dolgok. Ahhoz, hogy azt mondhassuk: „miért", tudnunk kellene, hogy az *E(...)* és *I[...]* műveletek alkalmazásának más tulajdonságai is vannak.

A megrögzött realisták, akik fenntartják, hogy példának okáért Newton tömegvonzástörvénye pontosan leírja a valóságot, s hogy az ebben a törvényben említett összes egységek (tömeg, távolság, gravitációs állandó, az alkalmazott matematikai műveletek és így tovább) ugyanolyan módon léteznek, mint ahogyan az elméletben szerepelnek – nos, a realisták hisznek abban, hogy *I[P]* azonos *P*-vel és *I[E(P)]* azonos *E(P)*-vel. Nincs semmiféle *a priori* ok

arra, hogy ennek a megfelelésnek lehetségesnek kelljen lennie, ám nyilvánvaló evolúciós előnyt biztosít bármely fajnak, amelynek birtokában van, és egészen biztos, hogy *mi* nem tárgyalnánk most ezt a kérdést, ha nem lenne birtokunkban. Ezzel szemben a szolipszizmus határán álló szuperidealista erősködhetne, hogy nincs semmi okunk azt feltételezni, hogy az *I* művelet univerzális jellegű – nem tudhatjuk, nem különbözik-e emberről emberre.

Párhuzam van az *I* és *E* műveletek ama követelményei, amelyek a felcserélhetőség fennállásához szükségesek, valamint a modern „nyilvános kódkulcsok" megválasztásakor használt kódoló műveleteknél megkövetelt tulajdonságok között. Lehetséges két személy között úgy közvetíteni kódolt üzeneteket, hogy mindketten különböző kódot használnak, amely a másik számára ismeretlen marad, és mégis képesek az egymásnak küldött üzenetet megfejteni. Ez sokkal biztonságosabb, mint azok az eljárások, amelyek esetében egyetlen közös kód másolatát kell a címzettnek továbbítani ahhoz, hogy képes legyen megfejteni az üzenetet. A szemléltetés kedvéért tételezzük fel, hogy valakinek el akarunk küldeni egy üzenetet, amely egy dobozban van elhelyezve. Az üzenet kódolását azzal jelképezzük, hogy saját lakatunkkal lezárjuk a dobozt. A dobozt úgy szeretnénk elküldeni valakinek, hogy képes legyen *anélkül* kinyitni („megfejteni"), hogy be kellene szereznie lakatkulcsunk másolatát. Ez lehetetlennek látszik, de nem az. Lelakatoljuk a dobozt, és elküldjük munkatársunknak, aki aztán lelakatolja az ő lakatjával, és visszaküldi nekünk. Mi levesszük a mi lakatunkat, és visszaküldjük neki, ő pedig most már ki tudja nyitni a saját kulcsával. Ahhoz, hogy ezt az eljárást két valódi kódoló művelettel is el lehessen végezni, a műveleteknek rendelkezniük kell a felcserélhetőség tulajdonságával. Ha az én kódoló műveletem *E*, az öné pedig *I*, akkor először *E*, majd utána *I* alkalmazása ugyanolyan hatással van az üzenetre, mint először *I*, majd utána *E* alkalmazása.

Hertz úgy érvelt, hogy gondolati képeinket, amelyeket a dolgokról alkotni tudunk, a felcserélhetőség követelménye nem határozza meg egyértelműen. Newton idejében ezt nem tudták. De a mozgástörvényeknek valójában számos különböző „képük" van. Később ezek közül néhányra Lagrange, Hamilton, Euler és Maupertuis talált rá. Amikor – tudósként – természeti törvényeket próbálunk megfogalmazni, végignézzük a lehetséges képeket, és kizárjuk azokat, amelyek nem felelnek meg bizonyos követelményeknek. Kidobjuk azokat, amelyek logikailag ellentmondásosak, mert ezek szerint valaminek egyszerre kell igaznak és hamisnak lennie, aminek következményeképpen bármiről levonható az a következtetés, hogy igaz. S végül kizárjuk azokat a képeket is, amelyek ellentétben állnak a természet tényleges működéséről szerzett tapasztalatainkkal. Végül azt bíráljuk el, hogy melyik a legtakarékosabb, azaz melyik ábrázolja a megfigyelések lényegét a

legkevesebb fölösleges ráadással. Mivel mindig gondolati képekkel foglalkozunk, számítanunk kell arra, hogy szükségképpen mindig lesznek fölösleges vonások. Csak annyit tehetünk, hogy számukat a lehető legkisebbre csökkentjük. Ez utóbbi kritériumot gondolati képeink módosítására és „beállítására" használhatjuk, ám különböző személyek különböző képekhez juthatnak el, hiszen az egyszerűség és a takarékosság szubjektív kritériumok. Egy vegyész valószínűleg másképpen szereti látni a dolgokat, mint egy fizikus.

Miután kiválasztottuk a világon előforduló dolgok legjobb gondolati képét, tovább haladunk, és elkészítjük e képek ábrázolását. A matematika csodálatosan alkalmasnak látszik erre a feladatra, és e körülmény értelmezéseit az 5. fejezetben fogjuk megvizsgálni.

Kant – legalábbis részben – feltehetően vallási késztetésből kritizálta a realista világnézetet. Istenfélő lutheránusként megértette, hogy a világegyetemnek a Newton követői teremtette mechanikus modelljét az ok és okozat változhatatlan törvényei kormányozzák, amelyek nem engednek teret a szabad akaratnak. Az az érve, hogy sohasem „a dolgokat önmagukban" figyeljük meg, hanem csak róluk alkotott szubjektív képünket vagy ábrázolásunkat, lehetővé tette számára, hogy összebékítse a newtoni álláspontot a szabad akarat létével. Newton merev oksági viszonya csak a megfigyelt dolgok képeinek szubjektív világát kormányozza, nem szükségszerű azonban, hogy a valódi „magukban való dolgokat" teljes mértékben az okság határozza meg. Annak ellenére, hogy bevallottan vonzódott a newtoni tervezési érvhez, meggyőzően bizonyította, hogy az nem egyéb, mint a természeti törvényekről alkotott képünkből levont következtetés, amely nem szükségszerűen felel meg a mögötte rejlő valóságnak. Minden nagy metafizikai „érv" – a tervezési, ontológiai, kozmológiai érv – csak *érv*, azaz valamilyen *feltevésekből* indul ki, és egy következtetést von le. Ez a következtetés nem többet és nem kevesebbet ér, mint a kiinduló feltevések, és azoktól sohasem lehet független. A kantihoz hasonló ellenérvek nem cáfolják, Newton híveinek érvei nem is bizonyítják őket. Bár Newton mozgástörvényeinek formája például mindenféle teleologikus szándékot kizár, és a vég-okokat kezdeti okokkal meg a belőlük következő későbbi állapotok kiszámítására szolgáló algoritmusokkal helyettesíti, mégsem szabad messzemenő metafizikai következtetéseket levonni ebből a képből. 1748-ban Maupertuis kimutatta, hogy Newton mozgástörvényeihez egy teleologikus elv felhasználásával is el lehet jutni. Definiálhatunk egy matematikai mennyiséget, a *hatást*, amely a tömeg, a sebesség és a test által megtett út szorzata. Maupertuis elve, amelyet ma „a legkisebb hatás elvé"-nek nevezünk, így hangzik:

> Ha a természetben valamilyen változás történik, az e változáshoz szükséges hatásnak a lehető legkisebbnek kell lennie.

Ez az elegáns gondolat a newtoni mozgástörvényekkel egyenértékű (bár abban az értelemben hathatósabb azoknál, hogy a fizika más területein is felhasználható a mozgásegyenletek levezetésére, ha már megtörtént a megfelelő hatás azonosítása), viszont, Newton megfogalmazásával ellentétben, teleologikus. Azt állítja, hogy az A-ból B-be mozgó test az összes lehetséges útvonal közül ténylegesen azon halad, amelyiken a hatás a legkisebb. Ezt az útvonalat ezért mind kezdeti, mind végállapota meghatározza. Maupertuis különös metafizikai jelentőséget tulajdonított ennek az eredménynek, „bizonyítéknak" tekintette „az Ő létezésére, aki a világot kormányozza". Korábban az olyanfajta érvekkel szemben, mint az, hogy „a lehetséges világok legjobbikában" élünk, fel lehetett hozni, hogy nem ismerünk semmilyen más világot, amelyikkel ilyen összehasonlítást tehetnénk, Maupertuis azonban azt állította, hogy e másik világok azok lennének, ahol a mozgás nem minimális hatással történnék. A mi világunk ebben a jól meghatározott értelemben optimális, ezenkívül pedig a természeti törvényeknek teleologikus oldalai is vannak (a XIX. század kommentátorai közül egyesek a kövületek létét a nem minimális hatás elvetélt világaiból származó maradványoknak tartották). E különcségekben az a tanulságos, hogy bemutatják: a természeti törvényeknek valamely képe, melyet úgy választottak ki, hogy csak annak feleljen meg, ami látható, hogyan tud teljesen ellenkező metafizikai benyomást tenni, mint egy másik képből nyert benyomás, mely kép viszont pontosan ugyanahhoz a természeti törvényhez vezet.

Kant és Hume logikus ellenvetései a matematikai természettörvények értelmezése és a belőle következő tervezési érv ellen egyelőre süket fülekre találtak. Hume 1776-ban meghalt, és irodalmi körökben csupán szentségtörő hírhajhásznak tartották. Kant műve csak 1796 után jelent meg angolul, és dagályos, kevéssé megnyerő modorban volt megírva. E tényezők megkönnyítették, hogy érveiket figyelmen kívül hagyják. Ám nem nehéz kitalálni, mi volt a valódi oka annak, hogy az angol tudósok nem vették komolyan az efféle filozófiai ellenvetéseket. Pontosan azért léptek igen sikeres korszakba, mert megszabadultak a filozófiai viták hatásaitól, a megfigyelések jelentése helyett a kifejezések jelentésével foglalkozó csatározásoktól. Azzal, ha ezeket a metafizikai ellenvetéseket napirendre tűzik, egy lépést tettek volna hátrafelé, a filozófiai vitatkozás labirintusa felé, ahol láthatatlan dolgok írják elő a látható dolgok értelmezését. E pszichológiai korlathoz az a tény is társult, hogy a viták egyedüli döntőbírájává a kísérlet és a megfigyelési adatok váltak. Kant és Hume ellenvetései nem hivatkoztak a világ megfigyelésére, míg a tervezési érvek, akár a newtoni változat, akár a biológia birodalmából előhozottak, ahol a „tervezés" számtalan példáját igazolták módszeresen, át meg át vannak itatva megfigyelésekkel. Az angol tudományos elme roppant

vonzónak találta ezt az empirikus kiindulási alapot. A tervezési érv idővel megdől – nem a logikai megalapozottságával szemben felhozott filozófiai ellenvetések, hanem a darwini evolúció eszméje dönti meg. Darwin a természetes világ felépítésében a látszólag a tervszerűséget alátámasztó részletes megfigyelések tömegére egy másik magyarázatot tudott adni, amely maga is részletes megfigyeléseken alapult. Azért aratott győzelmet, mert egy másik magyarázatot adott a természettudósok megfigyeléseire, nem pedig azért, mert aláaknázta a tervezési érv logikáját. Newton követői a Kopernikusz utáni korban éltek. Bár az ember kétségtelenül világnézetük középpontjában állt, a világról alkotott modelljük középpontjában már nem őt találjuk. Kant megközelítésének elfogadása visszafelé, a Kopernikusz előtti kor felé tett lépésnek látszott volna, ahol az ember volt mindennek a középpontja, hiszen az idealizmus az emberi elmének a világegyetem közepén ad helyet, és őt teszi meg kozmikus cenzornak.

Ugyanúgy, mint mostanság, a tudósok akkor is a tudósok által írt filozófiai értekezésekben bíztak meg legjobban. Éppen ezért a XIX. században írt leghatásosabb tudományfilozófiai mű John Herschel *Bevezető értekezés a természetfilozófia tanulmányozásába* c. műve volt. Herschel elfogadta, hogy a természeti törvényeket megfigyelés útján kell megismernünk. A tudós, mint írja, azzal foglalkozik, „hogy melyek az anyagba eredendően és megváltoztathatatlanul beléhelyezett elsődleges tulajdonságok és ... milyen a természeti törvények szelleme". Ez a naiv realizmusnak beillő kijelentés szemléletes példa arra, milyen korlátozott hatása volt a kanti gondolkodásnak a kor angol tudományának főáramára. Később a természeti törvények nagystílű elképzelésének kritikátlan elfogadását leghangosabban a kialakulóban lévő pozitivista mozgalom támadta, amely tagadta a tudományos törvények ontológiai érvényét, és merev operacionalista álláspontra helyezkedett. Az e nézetet képviselő leghatásosabb írók, William Jevons és Karl Pearson úgy próbálták csökkenteni a természeti törvények rangját, hogy megközelítésnek, egy tisztán gondolati tevékenység folyományainak tekintették őket. Jevons azt állította, hogy „a szigorú logikai vizsgálódás fényében a törvény uralma igazolhatatlan hipotézisnek bizonyul majd, a természet egyöntetűsége kétértelmű kifejezésnek, tudományos következtetéseink bizonyossága pedig nagyrészt illúziónak". A „természeti törvényeket" az események összefüggéseire vonatkozó, csak valószínűségen alapuló kijelentéseknek tekintette. Ezenkívül a termodinamika II. főtételét a természet állandósága ellen szóló érvként értelmezte. A II. főtétel a világegyetem kezdetére mutat, valamint egy igen szokatlan jövőre, amelyben a feltételek teljesen különböznek a maiaktól. Pearson szélsőségesebb volt. A természeti törvényeket tisztán gondolati választ tekintette a világról nyert

érzetekre. Joggal állítható azonban, hogy a kor kiemelkedő fizikusai nem osztották ezeket a természeti törvényekkel foglalkozó kifinomultabb nézeteket. Faraday, Maxwell, Kelvin és társaik mélyen vallásos emberek voltak, akik vita nélkül elfogadták azt a nézetet, hogy a természet törvényei valóságosak, és isteni utasítás rendelte őket a természet fölé.

Darwin törvényei

A természetes kiválasztódás egy rendkívül magas fokú valószínűtlenség létrehozásának mechanizmusa.

R. A. Fischer

A XIX. század közepéig az emberek egyértelmű választással álltak szemben a világ szerkezetét illetően: vagy kozmosz az, vagy káosz. Az előbbi esetben a rendnek meghatározott forrásból kell erednie, míg az utóbbi mindennek ellentmond, amit a természetben látunk. A természeti törvények, amelyek felfedték a világ gépezetét és tanúskodtak belső működéséről, mind a tudósokat, mind a lelkészeket arról győzték meg, hogy e törvények szerzője maga a rend és a logika. Ám ezután új doktrína kezdett kibontakozni, amely azóta is befolyásolja a természetben fellelhető rend eredetéhez fűződő viszonyunkat.

1813-ban egy, a londoni Szent Tamás-kórházban alkalmazott, száműzetésben élő amerikai orvos rendkívüli előadást tartott a Royal Societyben. Az orvos neve William Wells volt, előadásának címe pedig *Beszámoló egy fehér nőről, akinek bőre részint olyan, mint egy négeré.* Az előadásban Wells azt hozta fel az élőlények meglévő testi jellemzőinek magyarázatára, amit ma a „természetes kiválasztódás" folyamatának nevezünk. A hipotézist saját esettanulmányából vezette le, mely az emberi bőrszínnek az éghajlathoz való alkalmazkodásával foglalkozott. Az elfogadott nézettel szemben amellett állt ki, hogy az élőlényeknek a környezetükhöz való figyelemreméltó alkalmazkodását megmagyarázandó nem szükséges mesterséges tervezést feltételezni. Ha mi magunk el tudunk érni alkalmazkodást a tenyésztés általi mesterséges kiválasztással, akkor ugyanezt az alkalmazkodást „ugyanolyan hatékonysággal, bár sokkal lassabban a természet is el tudja érni". Ezenfelül felismerte, hogy a természetben nincs egyöntetűség: a természeti világ állandó változásban van, és az alkalmazkodás folyamata sohasem fejeződik be. Wells dolgozata 1818-ban jelent meg.

Ezek a nézetek fontosak, egyszersmind szélsőségesek voltak. Azt várhatnánk, hogy zajos ellenkezést és nyilvános feltűnést váltottak ki. Ám nem így

történt: senkire nem voltak hatással, senki nem idézte őket, sem dicséretet, sem helyeslést nem kaptak. Nehéz meghatározni, miért történt ez így. Wells elismert tudós volt, a Royal Society tagja, aki 1814-ben a harmatcseppek klasszikus elemzésével elnyerte a társaság Rumford-emlékérmét. Azáltal, hogy a természetes kiválasztódásról szóló munkáját csak Rumford-díjas dolgozata függelékeként közölte, lehetséges, hogy saját maga volt az oka elsikkadásának, hiszen a dolgozatot magát a tudományfilozófusok széles körben idézték a tudományos módszer használatának klasszikus példájaként. Bármi volt is az oka annak, hogy írását eleinte figyelmen kívül hagyták, Darwin figyelmét 1860-ban egy ismeretlen amerikai tudós végre felhívta rá, és *A fajok eredete* c. műve későbbi kiadásaiban Wells mint a természetes kiválasztódás elismert értelmi szerzője jelenik meg.

Darwin és Alfred Wallace Wellsnél sokkal szélesebb körben gyűjtött bizonyítékokat a természetes kiválasztódás mechanizmusára, mint a szerves világban tapasztalható rend magyarázatára. Munkásságuk eredményeképpen egy újfajta magyarázat vált törvényessé. Ha minden lehetséges változat véletlenszerűen keletkezik egy szaporodó rendszerben, akkor azok a változatok, amelyek leginkább képessé teszik a rendszert a szaporodásra, nagyobb valószínűséggel fognak túlélni, mint azok, amelyek kevésbé teszik erre képessé. A szaporodás ama termékei, amelyek legjobban alkalmazkodnak ahhoz a környezethez, amelyben élnek, könnyebben túlélnek, mint azok, amelyek rosszul alkalmazkodnak. Ennélfogva az idő és a véletlen képes létrehozni az élőlény és környezete közti figyelemreméltó illeszkedést. Ily módon a rend spontán kialakulása vég-okok vagy kifejezetten természetfölötti tervezés igénybevétele nélkül is megmagyarázható. Ez „a legéletképesebb fennmaradása" általi evolúció teljesen aláaknázta a hagyományos tervezési érvet a biológia birodalmában, bár nem húzta ki a talajt azon tervezési érvek alól, amelyek maguknak a természeti törvényeknek az előnyös jellegén alapultak; ha volt ezekre valamilyen hatása, még meg is erősítette az érv ez utóbbi válfaját, hiszen eszerint most már az élőlények és környezetük közti rendkívüli illeszkedés nem a világon kezdetben elrendelt állandóság, hanem a természeti törvények évmilliókon keresztül kifejtett hatásának eredményeképpen jött létre. Némelyek, mint például T. H. Huxley (1825–1895), a természetes kiválasztódás hatáskörét magukra a természeti törvényekre is megkísérelték kiterjeszteni, míg Lord Kelvin (1824–1907) és más konzervatív fizikusok vallási okokból ellenezték az evolúciót, és azzal érveltek: nem volt arra elég idő, hogy az emberi élet mindmostanig természetes kiválasztódással létrejöjjön. Mások, például James Clerk Maxwell (1831–1879) csak azokkal a kísérletekkel helyezkedtek szembe, amelyek a természetes kiválasztódás elméletét a biológia világán kívül is

alkalmazni próbálták, rámutatva a mikroszkopikus világ állandóságaira. Maxwell különös nyomatékkal hangsúlyozta azt a felfedezését, hogy az atomok (melyeket ő „molekuláknak" nevezett) egyformák, és tulajdonságaik nincsenek alávetve a természetes kiválasztódás folyamatának. Felismerte, hogy a természet hierarchiájában valahol meghúzható egy vonal, amely alatt a természetes kiválasztódás nem tud magyarázatot adni a rendre. Ezt a vonalat az atom méretskálája felett kell meghúzni.

Az olvasó már könyvünk bevezető fejezetében felfedezhette a természetes kiválasztódás elméletének hatását. Amikor valamilyen *a priori* igen alacsony valószínűségű állapot létét kell megmagyarázni, most először arról bizonyosodunk meg, hogy – függetlenül a kiindulási feltételektől – vajon ez a különleges állapot mindig hosszú idő elteltével valósul-e meg. Sőt bizonyos állapotokat kifejezetten szükségesnek fogunk találni ahhoz, hogy az őket észlelő élő szervezetek létrejöhessenek. Függetlenül attól, hogy *a priori* mennyire valószínűtlen előfordulásuk, nem szabad meglepődnünk azon, hogy ma léteznek. *A priori* rendkívül valószínűtlennek tetszhet az, hogy minden helyek közül, ahol csak ebben a végtelen világegyetemben bolygó létezhet, a Föld éppen egy csillag körüli pályán helyezkedjék el. A Föld ilyen elhelyezkedése azonban kétségkívül szükséges az intelligens életformák kialakulásához.

A darwini szemléletnek további kihívó mondanivalója is van a metafizikai eszmékről. Vegyük például Kantnak azt a gondolatát, mely szerint a természetről alkotott szemléletünknek kiküszöbölhetetlen előfeltételei az emberi fogalmi kategóriák. Kant Darwin előtti követőinek el kellett fogadniuk azt az egybeesést, hogy minden ember azonos fogalmi kategóriákkal rendelkezik és rendelkezett is mindig. Darwin követője az emberi elme kategóriáit a természetes kiválasztódás eredményének tekinti, tehát amit maga a fizikai világ – „a magánvaló dolog" – alakított ki. Ez a nézet pedig a realizmust támasztja alá. Ha ugyanis mind fiziológiai, mint pszichológiai értelemben a természetes kiválasztódás alkalmazkodásra késztető hatására adott válaszként lettünk olyanok, amilyenek most vagyunk, akkor sok tekintetben pontosan kell tükröznünk egy valóban létező fizikai világot, éppúgy, ahogyan az emberi fül a hang, a szem pedig a fény létezésére adott válaszként fejlődött ki. E nézet szerint velünk született fogalmi kategóriáink bármilyen egyetemessége a természeti törvények egyetemességével hozható kapcsolatba.

A legalkalmasabb megmaradásának elképzelését minden tudományág gondolkodói magukévá tették. Tulajdonképpen még jelen fejezet témájára is alkalmazhatjuk ezt a gondolatot. A világról alkotott gyermeteg elképzelések közül a világ harmóniáját és szabályosságát valamilyen emberen kívüli törvényhozásnak tulajdonító elképzelésnek volt először szelektív előnye amaz

egyszerű emberi lények számára, akik ezáltal képessé váltak arra, hogy a természet szabályosságait a saját javukra kihasználják. Az évszázadok folyamán az emberiség természet iránti kíváncsisága és a gondolkodásról való gondolkodása egyre bonyolultabbá vált, ám bizonyos eszméket továbbra is hasznosnak, következményeikben és felhasználhatóságukban gazdagnak talált. Ilyen a természeti törvények eszméje is, amely következetesen alkalmazkodott a változó szellemi környezethez, ám – éppúgy, mint a biológia birodalmában – a folyamatos túlélésre nincs biztosíték. A XX. század történetünk eddigi szereplői számára elképzelhetetlen absztrakciókat, eszméket és felfedezéseket hozott. Utódaikat a természeti törvények örökölt eszméje vezette, a valóság próbaköve pedig az eszmének a tovább már nem csökkenthető minimumra való visszaszorítására ösztönözte őket.

3

Nem látható világok

Egyre nyilvánvalóbbá vált azonban, hogy a természet másképpen működik. Alapvető törvényei nem úgy szabályozzák működését, ahogyan az a mi képzeteinkben közvetlenül megjelenik, ehelyett egy, a jelenségek mögött rejlő valamit irányítanak, amelyről nem tudunk képet alkotni oda nem tartozó dolgok bevezetése nélkül.

Paul Dirac

Mechanizmus nélküli mechanizmus

A tudományos fogalmak belső képek.

Heinrich Hertz

Galilei és Newton a matematika nyelvét választották a természet leírására. Nem ők voltak az elsők, akik ezt a pontos és általános nyelvet használták, de ők voltak legsikeresebb meghonosítói. Mégis, mivel a világ leírásának ezt a módját választották, bizonyos mértékben idealistának kellett lenniük. Ki kellett választaniuk azokat a dolgokat, amelyekről úgy érezték, hogy a fizikai jelenségek lényegét alkotják. Így például egy vörös golyó ütközése egy kékkel leírható olyan törvényekkel, amelyek nem veszik figyelembe a golyók színét. Még tovább menve, a törvények akkor írhatók le a legtanulságosabb módon, amikor ideális tárgyakra vonatkoznak, például erőhatás nélkül mozgó testekre.

A matematikai leírás roppant hatékonyan választja el a „miért"-et a „hogyan"-tól. A newtoni fizika igen nagy mértékben olyan eszköz volt, amely megjósolta egy rendszer végállapotát, ha megadták a kiindulási állapotot. Bár gyakran mechanisztikus világképnek nevezik, ez teljes félreértés: az egyetlen, amit biztosan nem tud megadni, az a változások lezajlásának *mechanizmusa*. Ez ugyanis azt kívánná meg, hogy tudjuk, miért történnek a változások. Elég az – írja Newton –, hogy a gravitáció „segítségével, ugyancsak matematikai tételek segítségével, levezethetők a bolygók, az üstökösök, a Hold és a tengerek

mozgásai" (Ford. Heinrich László). S hasonlóképpen, amikor Galilei a szabadon eső tárgyak gyorsulását tárgyalja, azt állítja, hogy „a szabadon eső tárgyak gyorsuló mozgásának oka nem feltétlenül tárgya a jelenség vizsgálatának".

A természeti törvények newtoni rendszerének ama két jellegzetessége, amelyekre figyelmünket irányítani kívánjuk, egyrészt a természet *látható* jelenségeire való összpontosítás, másrészt az az elv, hogy térben elkülönült testek között az erők *pillanatszerűen* hatnak. Mindkettő olyan elv, amely fokozatosan el fog tűnni. Eltűnésük módja egy újabb fejezetet nyit a természeti törvények és az általuk irányított dolgok kutatásában.

Erőterek

> Newton rendszere szerint a fizikai valóságot a tér, az idő, az anyagi pont és erő ... fogalmával jellemezzük. ... Maxwell előtt a fizikai valóságot – a természeti folyamatok lefolyását illetően – anyagi pontoknak képzelték, amelyek változásai csupán olyan mozgások, amelyeket parciális differenciálegyenletek határoznak meg. Maxwell után a fizikai valóságot úgy tekintik, mint mechanikailag nem értelmezhető, folytonos erőtereket, amelyekre parciális differenciálegyenletek érvényesek. A valóság felfogásában ez a változás a legmélyebbre ható és a leggyümölcsözőbb, amely a fizikában Newton óta végbement...
>
> Albert Einstein
> (Ford. Nagy Imre)

Newton gravitációs törvényének sikerei az árapályok, a Hold mozgása és a Földön észlelhető helyi mozgások magyarázatában – a pillanatszerűen ható és a távolság négyzetével fordítottan arányos erők fogalma alapján – azon előítélet elterjedésére vezettek, hogy a természetben ható erők csak a testek közötti távolságtól függenek, és mindig a testek középpontját összekötő egyenes mentén hatnak. Laplace ki is használta ezt a felfogást arra, hogy számos optikai és kémiai jelenséget a fellépő vonzóerők alapján magyarázzon meg. Newton maga ahhoz a régebbi gondolathoz ragaszkodott, hogy a fizikai erők mindig a testek közötti érintkezés útján jönnek létre. Nem tudott azonban módot találni arra, hogy ezt az elképzelést a gravitációs erő esetében is érvényesítse. Az biztos, hogy úgy érezte: nem lehetséges az összes fizikai jelenséget a gravitáció törvénye által kifejezett módon magyarázni. A gravitáció törvényének sikerével kapcsolatban *Principia* című művének bevezetésében ezt írta:

> Jó lenne, ha a többi természeti jelenséget is megmagyarázhatnánk mechanikai törvények segítségével. Ugyanis több okom van arra, hogy azt higgyem, hogy az összes jelenségek bizonyos erőktől függenek. Ezek hatására a testek részecskéi, egyelőre ismeretlen okok következtében, vagy egymás felé lökődnek, és végül szabályos testekké állnak össze, vagy pedig kölcsönösen eltaszítják egymást, és eltávolodnak egymástól.
>
> (Ford. Heinrich László)

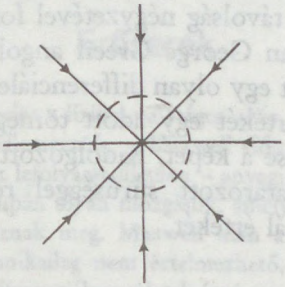
1773-ban Joseph Lagrange francia matematikus észrevette, hogy Newton gravitációs törvénye leírható egy olyan erőtér hatásaként, amely az egész teret folyamatosan betölti. Azt a matematikai mennyiséget, melynek helytől függő változása a Newton-féle, a távolság négyzetével fordítottan arányos erőhatást létrehozza, később 1828-ban George Green angol matematikus *potenciálnak* fogja nevezni. Laplace talált egy olyan differenciálegyenletet, amely megadja a potenciál változásának mértékét egy adott tömeg környezetében. 1813-ban Simeon Poisson tette teljessé a képet. Kidolgozott egy általánosítást, amely a térben elosztott és meghatározott sűrűséggel rendelkező tömeg bármely pontjára megadja a potenciál értékét.



3.1 ábra. Néhány erővonal (pontozott egyenes) és ekvipotenciális görbe (folyamatos körök) egy tömegpont környezetében. Az erővonalak és az ekvipotenciális görbék mindenütt merőlegesek egymásra

Ha összekötjük azokat a pontokat, amelyekben a potenciál értéke azonos, az eredményül kapott görbesereg – az *ekvipotenciális görbék* – egy szintvonalas térképet szolgáltat, mely szemlélteti az erőtérbe helyezett testre ható erő nagyságát. Egyetlen tömegpont által létrehozott gravitációs erőtér néhány ekvipotenciális görbéjét szemlélteti a 3.1 ábra. Azért mondjuk, hogy „néhányat", mert ezek a görbék végtelen távolságig terjedő folyamatos eloszlást mutatnak, amelyben minden elképzelhető távolsághoz tartozik egy görbe. Végtelen számú ilyen görbét rajzolhatnánk az ábrára, s ezek a teret folyto-

nosan betöltő erővonalak a *gravitációs erőtér* egy leírását alkotják. Ha egy testet eltérítünk az ekvipotenciális görbén történő mozgástól, akkor erre a testre olyan erő fog hatni, amely az új pozíciónak megfelelő ekvipotenciális görbére merőleges. Ily módon elképzelhetjük, hogy létezik egy folyamatos erőtér, amelyet a 3.1 ábrán mutatunk be. A gravitáció hatására történő gyorsulás iránya minden pontban megegyezik az adott ponton áthaladó erővonal irányával, és mértéke arányos az adott pont környezetében lévő erővonalak sűrűségével. Az egy adott tömegpontban végződő erővonalak számát a tömeg nagyságával arányosnak tekintjük.



3.2 ábra. Egy gömbhéj (szaggatott vonallal jelezve) felületén kívül megjelenő erővonalak azonosak azokkal, amelyeket egy, a gömbhéj középpontja helyén lévő, a gömbhéjjal azonos tömegű tömegpont kelt nagyobb távolságban. Egy gömb vagy gömbhéj külső gravitációs tere azonos azzal, amelyet egy velük megegyező tömegű, a középpontjukban elhelyezett tömegpont keltene

Gondoljunk itt arra a híres tételre, amelynek levezetésével Newton oly sokáig küszködött, mielőtt *Principiá*ját kiadta: nevezetesen arra, hogy egy gömbhéjon kívül mérhető gravitációs tér ugyanakkora, mint az, amelyet egy azonos tömegű, a gömbhéj középpontjának helyén lévő tömegpont kelt, amennyiben a gravitáció engedelmeskedik a fordított négyzetes törvénynek. A 3.2 ábrán erővonalakat látunk, amelyek egy tömegpontból indulnak ki. Tegyük fel, hogy ugyanitt elhelyezünk egy gömbhéjat (szaggatott vonallal jelölve). Ekkor a gömbhéj felületén kívül az erővonalak azonosnak látszanak, függetlenül attól, hogy a tömegpontból vagy a gömbhéj felületéből kiindulónak tekintjük-e őket. Ugyanannyi erővonal metszi a gömbhéj felszínét, mint amennyi eléri a tömegpontot, éppen ezért azonos tömegek által keltett gravitációs erőteret képviselnek.

Ez a kép a tömeg által létrehozott folytonos hatás eszméjét vezeti be a tömegpontok kölcsönös vonzása helyett. De több-e ez vajon, mint egy hasznos

analógia? Végül is az a sebesség, amellyel az erővonalak mentén a gravitációs kölcsönhatás terjedését elképzeljük, akár végtelen is lehet.

Ezek a példák arról tanúskodnak, hogy az erőtér fogalma bevonult a fizikusok „fegyvertárába". Az erőterek fogalma ma már megszokott dolog, és tudjuk, hogy a természetben különböző típusú folytonos erőterek léteznek. Az előbb megvitatott gravitációs erőtér a *skaláris* erőterek egyik fajtája. Csak nagysága különbözik az egyes pontokban. A tengerszint feletti magasság, valamint a léghőmérséklet vagy a légnyomás helytől függő változásai szintén skaláris terek, de hasonlóképpen ilyen tér a nyomdafesték mennyisége is ezen oldal különböző pontjain. Más terek azonban irányokat is megadnak minden pontban, ezeket *vektortereknek* nevezzük. Így például a szél iránya különböző helyeken, egy fadarab erezetének iránya vagy a folyadékok áramlásának irányai mind vektorterek. Az újságokban naponta közölt időjárási térképek egyike egy izobárokból* álló skaláris tér, és többnyire egy másik vektorteret is bemutatnak, amely a szélirányokat jelzi. Mindkét tér mutathat mind időbeli, mind pedig helytől függő változásokat. A két tér bonyolult módon befolyásolni is képes egymást. A szélirány vektorterében bekövetkező változás megváltoztatja a hőmérséklet és légnyomás skaláris tereit a környezetben.

Amikor a fizikusok ilyen tereket találnak a természetben, akkor olyan *téregyenletek* meghatározása érdekli őket, amelyek meg tudják mutatni, hogyan változik a tér erőssége a hely és idő függvényében a teret keltő forrás változásai során. Poisson téregyenlete meghatározza, hogyan változik a gravitációs erőtér a tömegek tetszőleges eloszlása esetében. E leírás egyenértékű Newton gravitációs törvényével. A természetben ható valamelyik erő leírásakor megpróbáljuk megkeresni a jelenség mögött rejlő téregyenletet (vagy tér-egyenlet-rendszert, ha az erő hatása bonyolult), amely megmondja, hogy egy adott forrás milyen erőteret kelt. Szintén megpróbáljuk meghatározni azokat az egyenleteket, amelyek megszabják az erőtérbe helyezett testek mozgását. Newton gravitációs törvénye esetében a mozgásegyenleteket egyszerűen az ő három törvénye fejezi ki. A gyakorlatban az erőterek mozgásegyenletei szinte mindig parciális differenciálegyenletek.

*Az azonos légnyomású helyeket összekötő vonalak. – *A ford.*

Elektromosság és mágnesesség

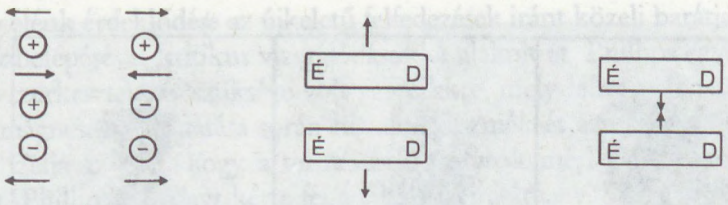
> Faraday lelki szemeivel a téren átívelő erővonalakat látott ott, ahol a matematikusok egymást távolból vonzó erőközpontokat képzeltek el; közeget látott ott, ahol ők puszta távolságon kívül semmit sem láttak; a jelenségek lényegét a közegben lezajló valós eseményekben kereste, míg a matematikusok beérték azzal, hogy azt megtalálni vélték az elektromos folyadékra gyakorolt távolhatás eszméjében.
>
> James Clerk Maxwell

Az erővonalak eszméjét legsikeresebben Michael Faraday (1791–1867) használta ki a XIX. században. Michael Faraday, akit csaknem népi hősnek tartottak, egy szegény patkolókovács fia volt, és iskolába csak egy falusi iskolába járt, mielőtt tizenhárom éves korában elhagyta családját, hogy könyvkötő tanonc legyen. Nyilvánvalóan több idejét töltötte a könyvek olvasásával, mint kötésével, és gyorsan tekintélyt parancsoló műveltségre tett szert saját erejéből. Ezt írja: „Szerettem a kísérleteket, és nagyon utáltam az üzletelést..., amelyet kegyetlennek és terméketlennek tartottam." Egyetlen törekvése az volt, hogy a tudomány berkeibe kerüljön. S ennek érdekében annyira kiművelte magát, hogy képes volt összeállítani Sir Humphrey Davynek a Royal Institutionban elhangzott előadásai alapján egy jegyzetanyagot, amely az előadások megértéséről tanúskodott. Irományait bekötötte, és elküldte Davynek egy levél kíséretében, melyben a Royal Institutionban kért állást. Davy így számol be arról, hogyan vitatta meg Faraday jelentkezését egyik barátjával:

> – Mit tegyek? Itt egy levél egy Faraday nevű fiatalembertől, meghallgatta előadásaimat, és arra kér, hogy alkalmazzam a Royal Institutionban. Mit tehetnék?
> – Mit tegyen? Alkalmazza üvegek mosogatására, ha érdemes ifjú, azonnal elvállalja, ha nem, akkor vissza fogja utasítani.
> – Nem, nem jó, valami érdekesebb munkában kell őt kipróbálnunk.

1813-ban kinevezték Davy asszisztensének, alacsony fizetéssel. Három éven belül tudományos közleményeket írt, tíz év múlva a Royal Society tagja lett, végül a Royal Institution igazgatói tisztségéig vitte. A kor legnagyobb kísérleti fizikusa volt, emellett kitűnő tudományos ismeretterjesztő. Mindezek ellenére szerény és visszahúzódó ember maradt, akit nem érdekelt az a számos közéleti tisztség, melyeket felajánlottak neki, és a Royal Institutionban maradt 1867-ben bekövetkezett haláláig.

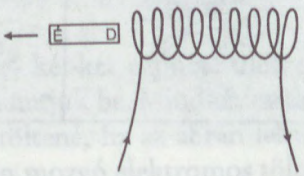
Akkoriban, amikor Faraday álláskérelmét írta Sir Humphrey Davynek, ismert volt, hogy léteznek elektromos és mágneses erők, és a gravitációs erő hatásához fölöttébb hasonló távolhatást mutatnak. Két ellentétes mágneses



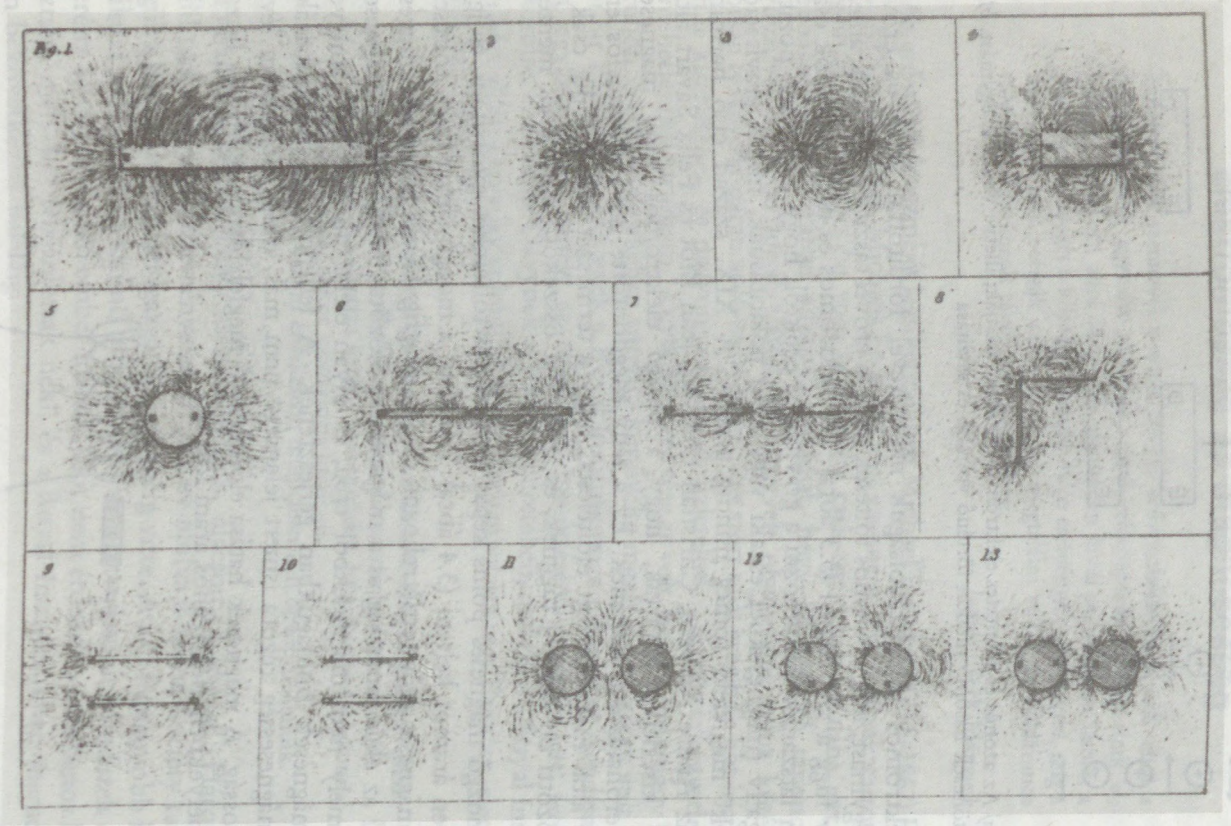
3.3 ábra. *a)* Az azonos és ellentétes elektromos töltések taszítják, illetve vonzzák egymást. *b)* A mágneses töltések hasonló módon történő vonzása és taszítása

vagy elektromos töltés távolságuk négyzetével fordítottan arányos erővel vonzza egymást, míg az azonos töltések akkora erővel taszítják egymást, amely ugyanígy függ a távolságtól (3.3 ábra). Az elektromos és mágneses erők csak annyiban látszanak különbözni a gravitációs erőktől, hogy a töltések pozitív vagy negatív (mágneseknél északi vagy déli) polaritásúak, míg a gravitációs „töltésnek" megfelelő tömeg mindig pozitív. A XIX. század első harminc évében az André Ampère, Christian Oersted, Jean Biot és Felix Savart által elvégzett kísérletek feltárták, hogy a *mozgó* elektromos vagy mágneses töltések erőhatásokat keltenek. Ez a tény megdöntötte azt a gravitációs erő törvénye által megalapozott előítéletet, hogy a természet erői mindig csak a testek közötti távolságtól függnek, és az azokat összekötő egyenesek mentén hatnak.

Egy mozgó mágneses pólus képes elektromos töltéseket gyorsítani, és így vezetőkben áramot kelteni (3.4 ábra). Ráadásul a mozgó elektromos töltések képesek mágneses erőteret létrehozni. Ezek a megfigyelések mély összefüggést fedtek fel az elektromosság és a mágnesesség között: létezik olyan mágneses erőtér, amely nem mágnesekből ered, és olyan elektromos erőtér, amelyet mozgó mágnesek önmagukban gerjesztenek. A felfedezések megmutatták, hogy a mágnesesség régóta ismert jelensége nem más, mint mozgásban lévő elektromosság. A mágnesek hatása előidézhető megfelelően elrendezett huzalokkal, melyekben elektromos áram folyik.



3.4 ábra. Mágnesek tekercsen keresztüli mozgása az elektromos töltések gyorsítását okozza, és ily módon elektromos áramot indukál

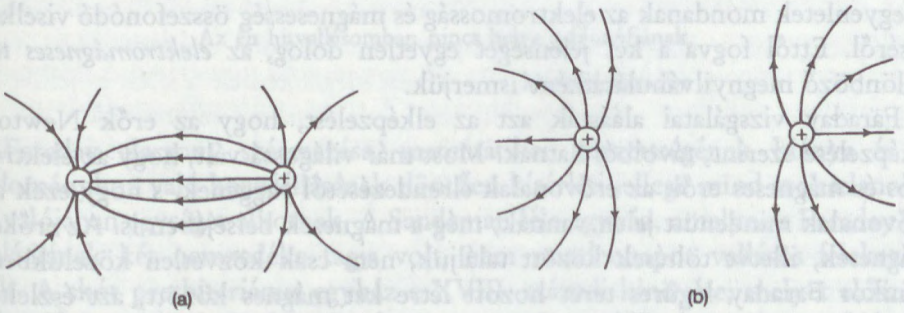


3.5 ábra. Mágneses pólusok köré szórt vasreszelékkel láthatóvá tett mágneses erővonalak képei, amelyeket Michael Faraday örökített meg, és saját, *Elektromosság* című munkájából származnak

Faraday élénk érdeklődése az újkeletű felfedezések iránt közeli barátja, Richard Phillips közbelépésével kritikus vizsgálódásokká alakult át. Phillips egy filozófiai folyóiratot szerkesztett, és szüksége volt egy cikkre, mely leírta volna az elektromosság és mágnesesség kutatása során kialakult eszmék és az elvégzett kísérletek történetét. Célja az volt, hogy a természetfilozófusok mérlegelhessék az új felfedezéseket. Phillips Faradayt kérte fel a cikk megírására.

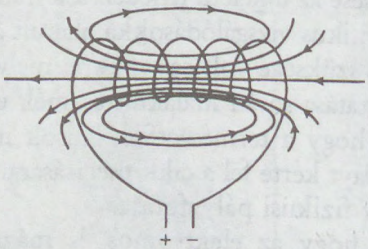
Így kezdődött Faraday fizikusi pályafutása.

Faraday megmutatta, hogy az elektromos és mágneses erők erőtereken alapuló leírása felfedi az elektromosság és mágnesesség egyenértékűségét. A 3.5 ábrán néhány, mágnesrúd körül létrejövő mágneses erővonalat mutatunk be. Minden egyes erővonal az egyik pólusnál kezdődik és a másiknál fejeződik be. Ha vasreszeléket hintünk egy darab papírra, amely egy mágnesrúd tetején fekszik, akkor azt látjuk, hogy a vasreszelék az erővonalak mentén rendeződik el. Amikor Faraday a mágnesrudat hossztengelye körül elforgatta, azt észlelte, hogy az erővonalak nem változnak. Számára ez azt bizonyította, hogy ezek nem különálló (oszthatatlan) vonalai az erő hatásának, amelyek valamilyen módon, mikroszkopikus kis fonalak gyanánt a mágneshez vannak erősítve. Ebben az esetben ugyanis megcsavarodtak volna, és így megváltoztatták volna a vasreszelék elrendezését.



3.6 ábra. Elektromos erővonalak azonos és ellentétes töltések környezetében

A 3.6 ábrán – *a)* és *b)* – két-két azonos, illetve ellentétes *elektromos* töltés elektromos erővonalait mutatjuk be. Mindkét esetben az erővonalak összessége – amely az egész teret betöltené, ha az ábrán feltüntetnék – alkotja a létrehozott erőteret. A tekercsben mozgó elektromos töltések (elektromos áram) által keltett mágneses tér, amelyet a 3.7 ábra szemléltet, ugyanúgy néz ki, mint a mágnesrúd tere a 3.5 ábrán.



3.7 ábra. Tekercsben mozgó elektromos töltések (áram) által indukált mágneses erővonalak. Hasonlítsa össze a mágnesrúd körüli erővonalak képével a 3.5 ábrán (1. kép)

Ezek az egyszerű példák egyrészt azt jelzik, hogy mély összefüggés van az elektromosság és a mágnesesség között, amely csak akkor jelenik meg a maga teljességében, ha forrásaik egymáshoz képest mozgásban vannak, másrészt azt, hogy ezt a szimbiotikus kölcsönhatást az erőterek fogalma mutatja meg legjobban. A kölcsönhatás valódi természete akkor vált teljesen világossá, amikor 1865-ben a fiatal skót, James Clerk Maxwell egy négy egyenletből álló rendszert alkotott meg, amely magában foglalta az elektromos és mágneses erőterek szimbiotikus kölcsönhatását, és sikeresen jósolt meg új jelenségeket. A mi technológiai társadalmunk jelentős mértékben azon nyugszik, amit ezek az egyenletek mondanak az elektromosság és mágnesesség összefonódó viselkedéséről. Ettől fogva a két jelenséget egyetlen dolog, az *elektromágneses tér* különböző megnyilvánulásaiként ismerjük.

Faraday vizsgálatai aláásták azt az elképzelést, hogy az erők Newton elképzelése szerint, távolból hatnak. Most már világossá vált, hogy az elektromos és mágneses erők az erővonalak elrendezésétől függenek, s hogy ezek az erővonalak mindenütt jelen vannak, még a mágnesek belsejében is. Az erőket mágnesek, illetve töltések között találjuk, nem csak közvetlen közelükben. Amikor Faraday légüres teret hozott létre két mágnes között, azt észlelte, hogy ez nem befolyásolja az erővonalakat.

Maxwell elektromágneses elmélete e természeti jelenségek olyan törvényeit adja meg, melyek valójában többet tárnak fel, mint a gravitáció és mozgás newtoni törvényei. Newton törvényei gyönyörűen kifejezték mindazt, ami ezekről a jelenségekről ismert volt. A Hold mozgását és az árapály-jelenségeket egymással összefüggésben magyarázták meg. A mozgások szabályait kifejezték, de nem *jósolták meg* alapvetően új, ismeretlen tulajdonságok létezését a természetben. Maxwell egyenletei azonban, miközben az elektromosság és mágnesesség összes kapcsolódó jelenségét leírták, nagy horderejű előrejelzéseket is tettek

a természet korábban nem is sejtett vonásairól. Maxwell egyenletei közül néhánynak azonos formája van a hullámok mozgását leíró egyenletekkel, s e hullámokat ebben az összefüggésben az elektromágneses tér hullámaiként kell értelmeznünk. Az a sebesség, amellyel ezek a hullámok a térben terjednek, az egyenletek szerint várhatóan másodpercenként 300 000 kilométerrel egyenlő, azzal az értékkel tehát, amely a mérések szerint a fény sebessége. Maxwell arra a következtetésre jutott, hogy az elektromágneses hullámok olyanok, mint a fény, amelyről szintén ismert volt, hogy hullámokra jellemző viselkedést mutat. Következésképpen létezniük kell a fény láthatatlan formáinak, melyek hullámhossza különbözik a látható fényétől. Maxwell matematikájának ezt a rendkívül lényeges előrejelzését Heinrich Hertz igazolta, aki 1887-ben felfedezte a rádióhullámokat, melyeknek hullámhossza a látható fény hullámhosszának milliárdszorosa. Később az elektromágneses hullámok egész spektrumát megtalálták.

S e felfedezés feltárta, hogy az elektromágneses tér nemcsak a távolhatás leírásának kényelmes eszköze, hanem önmagában is létező dolog. Megjósolható és mérhető tulajdonságai vannak, a fény és az elektromágnesesség szoros kapcsolatának közvetítője.

A sandemani világkép

Az én hitvallásomban nincs helye a filozófiának.

Michael Faraday

Faraday alacsony származása, matematikai képzettségének hiánya és a tudományhoz való hozzáállásának döntően kísérleti jellege mind szokatlanok, de valójában egységet alkotnak. A Sandeman-féle egyház, amelynek Faraday és családjának két nemzedéke tagja volt, nem mindennapos vallásos felekezet volt. A skót presbiteriánus egyház e XVIII. századi kinövése, melyet először John Glas, majd veje, Robert Sandeman vezetett, tartózkodott a szerveződéstől és a szertartásoktól. A teológia és a mindennapi élet megközelítésében rendkívüli mértékben fundamentalista volt. Igazából nem fogadta el a Biblia semmilyen teológiai magyarázatát, és ragaszkodott a szövegek szó szerinti olvasatához és értelmezéséhez. Nem voltak papjai vagy lelkészei, a bibliai szövegeknek a tagok és a kinevezett presbiterek általi közvetlen kinyilatkoztatására hagyatkozott. Furcsa módon számos tagjának, mint egykor a fiatal Faradaynak is, köze volt a könyvkiadáshoz. Faraday egyháza presbitere volt Londonban, és prédikátorként működött. Vallásos hitét fölöttébb komolyan

vette, s ez befolyásolta mindabban, amit tett és mondott. Régi barátja és tudós kollégája, John Tyndall, aki nem volt vallásos ember, ezt írta: „Azt hiszem, hogy Faraday hétköznapokon mutatott erejének és kitartásának java vasárnapi gyakorlataira vezethető vissza. Vasárnap olyan forrásból iszik, amely lelkét az egész hétre felfrissíti."

Faradayt vallásos nézetei elfogulttá tették a Biblia egyszerű, elméletektől mentes felfogása iránt, s ugyanúgy tekintette a természet értelmezését. A matematikai fizikus, aki a természet bonyolult, elméleti leírását alkotja meg, éppen olyan volt számára, mint az Igét szőrszálhasogató módon értelmező bölcsek, akiktől egyháza elfordult. Faraday úgy beszélt a természet vizsgálatáról, mint a természet könyvének olvasásáról. Az ő olvasata szó szerinti és egyszerű volt: annak kiterjesztése, amit a sandemanisták „egyszerű stílusnak" neveztek. Az egyedüli mód megtudni azt, hogy mi van a természet könyvében: a kísérleti vizsgálat. Abban hitt továbbá, hogy vizsgálatai Isten természeti törvényeit fogják feltárni, olyan törvényeket, melyek párhuzamba állíthatók lesznek majd az erkölcsi törvényekkel, melyeket „kísérleti" úton ismert fel a Biblia olvasása során. Ez a háttér bizonyos fokig megmagyarázza Faraday állásfoglalását az erővonalakkal, valamint nagy hírű kortársai matematikai munkáival kapcsolatban. A természet isteni törvényeinek szó szerinti értelmezése arra indította őt, hogy a látható erővonalakat, melyeket mágnesei és tekercsei kirajzoltak, teljesen valóságosnak tekintse. Matematika iránti megvetése a matematikát kifejezetten ellenszenvesnek tekintő egyénről tanúskodik, nem pedig olyasvalakiről, akinek csupán a matematikai módszerekben való járatossága hiányos. A sandemanisták erősen idegenkedtek a jelek és jelképek bármely használatától, mert egyedül Isten tulajdonának tekintették őket. A matematika használatát az Isten által teremtett valóság gyarló emberi formába kényszerítésének tekintették – a természet könyve magyarázatának a tudomány „teológusai" által. *Traduttore, traditore*[*].

A szimbólumok elutasítása némiképpen emlékeztet az első színész által kiváltott ősi ellenkezésre. Eszünkbe ötlik, hogyan lépett ki a kórusból Theszpisz, hogy megszemélyesítse a szereplőt, akiről az ének szólt. E cselekedetével megalapította a színészi foglalkozást, amelyet azonban még hosszú ideig veszélyes, elítélendő eretnekségnek tartottak, mert utánozza az isteneket és bitorolja rangjukat.

[*]A fordító – ferdítő. – *A ford.*

A szemléletesség alkonya?

Maxwell elmélete Maxwell egyenleteit tartalmazza.

Heinrich Hertz

Faraday tudományhoz való sandemanista hozzáállása gyakorlatias és teljesen matematikamentes volt, így nem meglepő, hogy Maxwell elektromágnesességet magyarázó, magas szintű matematikai leírását érthetetlennek találta. Egyszer megkérdezte Maxwellt, nem tudná-e következtetéseit „közönséges nyelven ugyanolyan teljességgel és világosan elmondani, mint matematikával?... [és így] ... lefordítani azokat a hieroglifák nyelvéről?"

Mikor Maxwell elkezdett tanulni az elektromágnesességről, cambridge-i egyetemi hallgató volt, akit érdekelt a matematika. Megemlíti, hogy elhatározta, elolvassa Faraday munkáit, mielőtt a matematikai elemzéseket elolvasná. Figyelmeztették ugyanis, hogy „különbség van aközött, ahogyan Faraday, illetve ahogyan a matematikusok fogják fel a jelenséget". Maxwell azonban hamarosan felismerte, hogy Faraday erővonalait le lehet fordítani a matematika nyelvére. Természetes ösztöne Faradayének éppen az ellentéte volt.

Faraday matematikai képzettségének hiánya és a szimbólumoktól való idegenkedése miatt eszméit sok tehetséges kortársa nem vette komolyan, ő pedig képtelen volt megérteni a matematikai fizikusok, például Ampère és Maxwell elméleti munkáit. Ez megnehezítette, hogy forradalmi eszméi közkinccsé váljanak. A távolhatás eszméje mélyen gyökerezett, nagyon is érthető okokból: hihetetlenül sikeres volt az erőhatások működésének magyarázatában. Néhány filozófus, mint Kant és Hume, már korábban megkísérelte megdönteni, de érveiket az angol tudósok zöme figyelmen kívül hagyta. Fontos azt is felismerni, hogy mennyire erőteljessé vált a mechanikai magyarázat vonzereje. Tulajdonképpen szinte meghatározása volt annak, aminek a viktoriánus fizika tekintette magát. Így aztán az erőtérhez hasonló jelenségeket kivétel nélkül mechanikai modellek alapján magyarázták. Még egy olyan absztrakt módon gondolkodó elme is, mint Maxwell, úgy képzelte el az elektromágneses teret, mint összenyomhatatlan folyadékot, amely az erővonalak által alkotott csövekben áramlik.

A Faraday erővonalainak elfogadásától való idegenkedésnek alapvetően esztétikai természetű oka volt – a legtöbb matematikai gondolkodású tudós az erővonalakat csak csúnya, nehézkes konstrukciónak tekintette, amely nem segíti elő annak megértését, hogy mi is *valójában* egy mágnes. A királyi csillagász „értelmetlennek" tartotta Faraday eszméit. Szerencsére olyan befolyásos tudósok, mint Kelvin és Maxwell, megértették Faraday eszméinek ígéretes

voltát, és Maxwell munkássága végül is elismertette őket. Igazából Maxwell az erőtér-fogalom horderejét szélesebb összefüggésben látta. Faradayhez intézett egyik magánlevelében kifejti a gravitáció erőtér jellegére vonatkozó elképzeléseit:

> A Nap által keltett erővonalak tőle kifelé terjednek, és amikor egy bolygó közelébe jutnak, elhajolnak, így minden bolygó tömegétől függően eltérít pályájáról bizonyos számú erővonalat, és saját erővonal-rendszerével helyettesíti azokat. Így olyannak látnánk, mint egy üstököst, ha az erővonalak láthatóak lennének.

Maxwell felismerte, hogy Faraday erővonalai tulajdonképpen egyenértékűek a távolhatással, ha az elméletbe a Lagrange, Poisson és Green által elgondolt potenciáltér fogalmát helyesen építik be. Maxwell elméletének azonban önmagában is voltak nehézségei. Az az eljárás, ahogyan Faraday fizikai eszméit matematikai nyelvre fordította, olyan absztrakciókat alkalmazott, amelyek Faradaynél sokkal jobb matematikusokat is zavarba ejtettek. Egyesek, mint például Kelvin, nem tartották kielégítőnek Maxwell elektromágneses egyenleteit, mert nem tartalmaztak szemléletessé tehető tényeket: mágikus receptek voltak, amelyek helyes eredményeket szolgáltattak. Ennél azonban többet nyújtottak: új kérdések feltevéséhez vezettek. Sikerük elég misztikusnak tetszett ahhoz, hogy Hertzet a következő megjegyzésre indítsák: „Óhatatlanul az az érzésünk támad, hogy ezeknek az egyenleteknek önálló létük és intelligenciájuk van, hogy okosabbak nálunk, sőt még megalkotójuknál is, hogy többet nyerünk belőlük, mint amennyit valaha is beléjük építettünk."

Maxwell a természeti törvények olyan kifejezését találta meg, melynek következményei a felfedezésüket lehetővé tévő ismereteken messze túlmutattak. Ezentúl a már ismert dolgok magyarázata a jövendő természeti törvényeknek csupán másodlagos feladata lesz.

Matematikai modellezés

> A matematikai fizikusoknak egyik iskolája ellenzi azoknak az elgondolásoknak a bevezetését, melyek nem kapcsolódnak közvetlenül észlelhető és mérhető dolgokhoz. ... Jómagam azt tartom, hogy ha egy új fogalom bevezetése elősegíti a gondolatok világosságát, akkor – még az esetben is, ha pillanatnyilag nem tudjuk pontosan meghatározni értékét – bevezetése nemcsak jogos, hanem kívánatos is. A ma megmérhetetlen holnapra mérhetővé válhat.
>
> J. J. Thomson

Az analógia használatát a természet valamely részének felderítésére – egy másik részével való összehasonlítás útján – először Descartes vezette be önállóan kifejtett módszerként. Azokkal a kritikusokkal szemben, akiknek érvelése szerint az analógiák mindig különböznek valamilyen (esetleg) fontos vonatkozásban a tükrözendő valóságtól, Descartes odáig ment, hogy egy jelenség magyarázatának elfogadásához szükséges feltételnek tartotta, hogy legyenek analógiái a tudomány más területeivel:

> Azt állítom, hogy az analógiák a legalkalmasabbak az emberi elme számára rendelkezésre álló módszerek közül arra, hogy a fizikai kérdésekkel kapcsolatos igazságot megmutassák; olyannyira, hogy ha valaki olyasmit feltételez a természetről, ami semmilyen analógiával nem magyarázható, akkor azt gondolom, hogy egyértelműen bebizonyítottam a feltevés hamisságát.

Descartes ezt az elvet követte a mikroszkopikus fizikai események felnagyított modelljeinek gyakori alkalmazásával. Még csepegő boroskádakat, teniszlabdákat és sétapálcákat is felhasznált a fénytörés modelljének felépítéshez. Állításait talán a dolgok egységébe vetett hite bizonyítékának is tekinthetjük. Az analógiák létezésének szükségszerűsége a természet bizonyos felépítési elveinek egyetemességébe vetett hitét tükrözi, mely elvektől azt várja, hogy különböző összefüggésekben újra és újra megjelenjenek. Egy olyan világ, melyben minden mindig új, azt követelné meg, hogy minden jelenség vizsgálatára új tudományt alkossunk. Egy efféle világnak nem volnának általános természeti törvényei, minden öntörvényű lenne.

Kevésbé absztrakt szinten az egyszerű modellekre és analógiákra való összpontosítás elősegíti a vizsgálódást, mert lehetővé teszi a szemléletes látásmódot. Maxwell figyelemreméltó kezelésében e stratégia használata újabb, kifinomultabb szintre lépett.

Az elektromágneses jelenségek elméletének magyarázatában Maxwell szívesen használt különféle analógiákat és mechanikai modelleket. A kontinentális Európa puristáit ez igencsak bosszantotta. Úgy gondolták, hogy ez újabb bizonyítéka az angolszászok ingerlő vonzódásának a csak *szemléletes* fogalmakat használó fizikai elméletek alkotásához. Maxwell azonban nem volt ilyen szerepbe beskatulyázva. A mechanikai modelleket nemcsak a vizsgált fizikai jelenség leírására vagy bemutatására használta, hanem inkább arra, hogy a jelenség lehető legjobb *matematikai modelljének* keresésében segítse őt. Ez volt az a mód, ahogyan Faraday leírásait használta már akkor, amikor diákként először olvasta őket. A tudományban időközben olyan előrehaladás történt, amely alátámasztott egy efféle „opportunista" megközelítést. Kelvin

felfedezte, hogy az anyagi testekben lejátszódó hővezetés szintén leírható a távolság négyzetével fordítottan arányos törvényszerűség szerint, éppen úgy, mint a gravitáció. Maxwell meglátta, hogy a közöttük lévő jelentős fizikai különbségek ellenére mégis lehetséges két természeti jelenség azonos matematikai leírása, és továbblépett annak bevezetése felé, amit ma *matematikai modellezésnek* neveznénk. A természet leírásának pontos, minden elképzelhető fizikai részletet figyelembe vevő leírása – mint gyakorlat – a második helyre került, matematikai kifejezésének és analógiáinak megalkotása mögé. A matematikai leírás olyan logikai vagy szemléleten alapuló lépésekkel végezhető el, melyek közül nem mindnek kell pontos megfelelője legyen a természetben: csupáncsak katalizátorok ezek az igazolható egyenletek végső rendszerének kidolgozásában. Maxwell eléggé egyértelműen magyarázza meg ezt az új megközelítési módot:

> Ahhoz, hogy fizikai elméletek elfogadása nélkül legyenek a fizikára vonatkozó eszméink, hozzá kell szoknunk a fizikai analógiák létezéséhez. Fizikai analógián azt a részleges hasonlóságot értem két különböző tudományterület törvényei között, amely révén az egyik megvilágítja a másikat. Ily módon minden matematikai jellegű tudomány a fizikai törvények és a számok törvényei közti összefüggésen alapul, mégpedig úgy, hogy az egzakt tudományok célja a természeti problémáknak mennyiségek meghatározására való visszavezetése, számokkal végzett műveletek útján.

A matematikai leírások iránti elragadtatást a matematikusok érdeklődése nagyban támogatta. A potenciálok és hullámok elmélete az alkalmazott matematika önálló területévé kezdett kifejlődni. E fejleményekben sok esetben a legérdekesebb mozzanat a különböző koordináta-rendszerek általánossá váló felhasználása volt a fizikai jelenségek parciális differenciálegyenletekkel történő modellezése során.

A koordináták mindennapi használata mindannyiunk számára ismerős. Amikor megbeszélünk egy találkozót valakivel, *négy* koordinátát kell megadnunk: a találkozás idejét, és három másik koordinátát, amelyek egyértelműen meghatározzák a találkozás térbeli helyzetét terünk három, egymásra merőleges dimenziójához viszonyítva. Az ilyenfajta helykoordinátákat Descartes-féle koordinátáknak nevezzük. Használatuk azonban nem mindig kényelmes. A Föld felszínén ehelyett hosszúsági és szélességi koordinátákat használunk. Lamé volt az első, aki rendszeres elméletet dolgozott ki a tetszőleges koordináta-rendszerben megadott fizikai egyenletekre vonatkozóan. Az anyagok rugalmas alakváltozásának vizsgálata érdekelte, érthető tehát, hogy

miért volt szüksége a természet törvényeinek olyan leírására, amely rugalmasabb, mint azok, amelyeket általában a sima, nem deformált felületek esetében alkalmaznak.

Ha egy szimmetrikus objektumot vizsgálunk, akkor megadható egy természetes koordináta-rendszer, amelyben leírása a legegyszerűbb lesz. Amikor azonban az objektum eltorzul, elveszítheti szimmetriáját, és ekkor az eredeti koordináta-rendszer használata szükségtelenül bonyolult leírást eredményez. Lamé megmutatta, hogyan kell a fizikai egyenleteket általános koordináta-rendszerben kifejezni. Eljárása felfed egy ki nem mondott hitet, mely szerint a fizikai törvényeket matematikai alakban kell megadni, de a törvényeknek fölötte kell állniuk az adott esetben alkalmazott matematikai módszereknek. A természeti törvények nem függhetnek attól, hogy milyen formában kívánjuk kifejezni őket. Nem létezhet kitüntetett koordináta-rendszer, amely az *összes* problémát leegyszerűsítené. Ahhoz, hogy ennek az egyszerű elgondolásnak a következményeit megértsük, egy fiatal svájci szabadalmi hivatalnok közreműködésére lesz szükségünk.

A tér és az idő összefonódnak

> ... egy olyan paradoxonban találtam meg ezt az elvet, amelyre már 16 éves koromban rábukkantam. Ha a fénysugár nyomában *c* sebességgel haladok..., ezt a fénysugarat nyugvó, térbeli rezgésű elektromágneses erőtérként kellene észlelnem. Ilyen azonban nincsen, mégpedig sem tapasztalatilag, sem a Maxwell-egyenletek alapján.
>
> Albert Einstein
> (Ford. Nagy Imre)

A természeti törvényeknek Newton által rajzolt képe, melyet Maxwell kifinomultabb matematikája is megőrzött, matematikai jellegű, abszolút szabályok együttese volt, melyek megszabták, hogyan változnak a testek és erőterek a hely és idő függvényében. Az a tény, hogy a természeti törvényeket legcélszerűbben a változásokat kihangsúlyozó módon lehet kifejezni, később arra sarkallta a filozófusokat, hogy az előrelátást (predikciót) és cáfolást (falszifikációt) tartsák olyan próbáknak (teszteknek), amelyek megmondják, hogy a feltételezett változások valóban megegyeznek-e a tapasztalatokkal. A természetben lezajló események színterét azonban állandónak tekintették. A newtoni tér abszolút változatlan, minden megfigyelő szemében azonos keret volt, ehhez viszonyítottak minden mozgást. S az időről hasonlóképpen feltették, hogy azonos, egyenletes ütemben és ugyanolyan módon folyik a világegyetem

bármely részében, akárhol figyelik is meg. A tér és az idő definiálatlan fogalmak voltak, ennek ellenére mindenki számára jól ismertek és nyilvánvalóak. Talán mindenki számára, kivéve Albert Einsteint, akinek speciális és általános relativitáselmélete később gyökeresen megváltoztatta a világegyetem működéséről alkotott képünket. Elméletének lényeges elemei és kísérleti igazolásuk számos forradalmi tanulsággal szolgálnak a természeti törvényekről:

1. A természeti törvényekben csak relatív mozgások szerepelnek.
2. Nem létezik abszolút tér és idő. Relatív mozgásban lévő megfigyelők számára ezek különböző dolgokat jelentenek.
3. Az információközlés sebességének van egy maximális értéke.
4. A tömeg és az energia egyenértékűek.
5. A tömeg és az energia jelenléte a térben és időben meghatározza a tér geometriáját és az idő múlásának sebességét.
6. A gravitáció nem távolhatás.

A természeti törvények értelmezésében bekövetkezett, imént említett változások nem voltak forradalmiak abban az értelemben, hogy teljesen megdöntötték volna Newton rendszerét. Inkább azt mondhatjuk, hogy a newtoni törvényekhez képest sokkal tágabb feltételek között írták le az eseményeket. Ha a mozgás sebessége sokkal kisebb, mint a fénysebesség, és a gravitációs erőtér gyenge, mint mindennapi életünkben, akkor Einstein gravitációs és mozgástörvényei Newton törvényeivel azonossá válnak. Ám szokatlan és teljesen váratlan, amit arról jósolnak, hogy mi fog történni a nagy sebességek világában.

Időnként előfordul, hogy furcsa érzésünk támad egy mozdulatlan vonatban ülve. A vonat látszólag elindul a peronról, de hirtelen tudatára ébredünk, hogy csupán egy másik vonatot láttunk ellenkező irányban mozogni, ami egy pillanatra megtévesztett minket, úgyhogy azt gondoltuk, *mi* mozgunk. De hogyan dönthetjük el, hogy igazából nem mi mozgunk? Ezt általában onnan tudjuk, hogy észrevesszük: kocsink nem rázkódik, vagy mert látjuk, hogy nem mozgunk egy nyugalomban lévő másik testhez – esetleg a peronhoz vagy a másik ablakban látható tájhoz – képest. Mi volna azonban akkor, ha vonatunk felfüggesztése tökéletes volna, és az ablakokból semmit nem látnánk, csak a másik vonatot. Meg tudnánk-e mondani, ki mozog, ki nem? Einstein – éppúgy, mint előtte Descartes, Galilei és Newton – tisztán látta: ha a vonatok egyenletes sebességgel, nem gyorsulva mozognak egymáshoz képest, akkor egyetlen utas sem tudja megmondani, hogy melyik vonat mozog, melyik nem. Nincs olyan, az utasok által az egyik vagy másik vonaton elvégezhető mecha-

nikai kísérlet, amely megadná abszolút sebességüket valamilyen univerzális mérőponthoz viszonyítva. A legtöbb, amit valaha is megtudhatnak, az az egymáshoz vagy a vasúti pályához viszonyított relatív sebességük. Nem tudják megállapítani, hogy a pálya mozog-e valamilyen állandó sebességgel a Naphoz vagy a csillagokhoz képest. Ám ez nem jelenti azt, hogy ez az információ rejtve van előttük, illetve hogy a tudományos műszerek korlátozott pontossága miatt gyakorlatilag nem határozható meg. Ezt az információt nem lehet megszerezni, mert nem létezik. A vonatoknak nincsen semmiféle „abszolút" sebességük, mert nem létezik a hosszúság és az idő abszolút mértéke, melynek segítségével meghatározhatóak lennének. Galilei teljesen tisztában volt ezzel a naiv relativitással, és a számára ismerős közlekedési módokra hivatkozva írta le. Zárkózzon be egy hajó kabinjába a fedélzet alatt: írjon papírra egy lúdtollal, vagy figyelje az asztalán lévő akváriumban a halat. Nincs olyan megfigyelés, amelynek alapján megbizonyosodhatna arról, hogy a hajó mozdulatlan-e, vagy egyenletes sebességgel mozog. Csak amikor sebessége *megváltozik*, akkor fog a tinta másképpen folyni, és akkor fog a hal egy kitüntetett irányban úszni.

Einstein híres elődeinél tovább akarta vinni e logikát, és el akarta érni, hogy Maxwell elektromágneses törvényeit se lehessen felhasználni a nyugvó állapot és az egyenletes mozgás különbségének kimutatására. Milyennek kell hát a természetnek lennie ahhoz, hogy Galilei „relativitási" elve ne csak a mechanikára, hanem a természet összes törvényére vonatkozzon?

Vegyünk két csoport tudóst, és zárjuk be őket különálló, elszigetelt laboratóriumokba, amelyek egymáshoz képest állandó sebességgel mozognak. Einstein ilyen esetben azt várta el, hogy a tudósok ugyanazokat a fizikai törvényeket találják érvényesnek mindkét laboratóriumban. Az egyes mennyiségek értékét különbözőnek mérhetik, de a törvényeket vagy a különböző mennyiségek közötti összefüggéseket egyformának fogják találni. Ez a helyzet a vonaton ülő utasok esetétől igencsak eltérőnek látszik, de valójában ugyanarról van szó. A tudósok két csoportja képtelen olyan módot találni, amely megmondaná, hogy az ő laboratóriumuk mozog-e, és a másik van nyugalomban, vagy fordítva, mert a természet egyetlen törvénye sem függ ettől a különbségtől. E „gondolatkísérlet" eredménye megfogalmazható úgy is, hogy mélyenszántó gondolatot mondjon ki azokról a természeti törvényekről, amelyeket általában Einstein *speciális relativitáselméletének* nevezünk (annak ellenére, hogy invariáns dolgokra vonatkozó állítások):

> A fizika törvényei az összes egyenletes relatív sebességgel mozgó megfigyelő számára ugyanazok.

A korábbi elképzelésekhez képest az általánosítás (ámbár itt nincs is világosan kifejtve) kis mértékű. A „mechanika" szó helyettesítése a „fizika" szóval megköveteli, hogy a törvényekbe az elektromágnesesség és a fény törvényszerűségeit is beleértsük.

Ez a tétel a természeti törvényekről való emberi gondolkodás érdekfeszítő előrelépését jelzi. Először ismeri fel tételesen kifejtve annak szükségét, hogy a természeti törvények leírását úgy szövegezzük meg, hogy azok függetlenek legyenek tőlünk, megfigyelőktől. Ha az elszigetelt laboratóriumokban a tudósok a fizika törvényeit felhasználva nemcsak relatív, hanem abszolút mozgásukat is meg tudták volna állapítani, akkor a törvények a különböző laboratóriumokban eltérőek lettek volna. A törvények szubjektív elemeket tartalmaztak volna, függtek volna megfigyelőik mozgásállapotától. Nem lehettek volna teljes mértékben univerzális törvények.

Ahhoz, hogy a relativitás elve igaz legyen, a természetnek néhány tekintetben meglepő módon korlátozottnak kell lennie, ugyanakkor néhány újfajta szabadsággal is rendelkezik. Maxwell elektromágneses törvényei minden további nélkül kielégítik a relativitás elvét, Newton mozgástörvényei azonban csak addig engedelmeskednek a relativitás elvének, amíg az egymáshoz képest mozgó laboratóriumokban a tudósok nem használnak kísérleteikben fénysugarakat vagy elektromágneses erőtereket. Einstein speciális relativitáselmélete Newton elméletének revíziója volt, mely arra irányult, hogy összeférhetővé tegye Newton teóriáját Maxwell egyenleteivel és a relativitás elvével. A „klasszikus" fizika beteljesítése volt tehát.

A relativitás elmélete – a relativitás elvén kívül – még egy invariancia létezését követeli meg:

> Bármely két, egyenletes relatív sebességgel mozgó megfigyelő azonosnak fogja találni a fény vákuumban mért sebességét.

E kikötés egyik következménye az, hogy légüres térben a fény sebessége független a fényt kibocsátó forrás sebességétől. Függetlenül attól, hogy egy megfigyelő milyen gyorsan mozog, a fény üres térben mért sebességét azonos értékűnek találja: a fénysebesség természeti állandó. Ez az elv, amely megoldja a tizenhat éves Einsteinnek a jelen szakasz mottójában ismertetett dilemmáját.

A newtoni mechanika azt állította, hogy ha egy, a földhöz képest V sebességgel haladó kocsiból kilövünk egy lövedéket U sebességgel, akkor a lövedék földhöz viszonyított sebessége éppen

$$\text{relatív sebesség} = U + V \tag{3.1}$$

lesz. Einstein két elve azt követeli meg, hogy a válasz

$$\text{relatív sebesség} = (U + V)/(1 + UV/c^2) \tag{3.2}$$

legyen, ahol c a fény sebessége. Észrevesszük, hogy Newton törvényei szerint a különböző megfigyelőknek eltérő fénysebességet kell mérniük. Ha a földhöz képest V sebességgel mozgó járműből lézersugarat bocsátunk ki U sebességgel, amely megegyezik a fény vákuumban mért c sebességével, akkor a lézersugár földhöz viszonyított sebessége a newtoni egyenlet szerint $c + V$ lesz, ami nem azonos c-vel. A newtoni eredmény a megfigyelt tényekkel ellentmondásban van, és ellentmond Maxwell elektromágneses elméletének is. Ez volt az, ami a fiatal Einsteint nyugtalanította. Ha ugyanis egy fénysugáron üldögélne, akkor a newtoni elképzelés szerint egyetlen más fénysugár sem érhetné utol, vagyis semmiféle fény nem lenne látható számára. A következtetést képtelennek találta.

Einstein törvényének (3.2) megvan az a tulajdonsága, hogy ha U-t egyenlőnek vesszük c-vel, akkor a relatív sebesség c, bármekkora is V értéke. Ténylegesen – a (3.1) egyenlettel ellentétben – a (3.2) törvény összhangban van a kozmikus sebességkorlát létezésével. Ha sem U, sem V nem haladja meg c-t, akkor a relatív sebesség (3.2) soha nem haladhatja meg c-t.

Befejezésképpen megjegyezzük, hogy ha olyan V és U sebességeket vizsgálunk, amelyek sokkal alacsonyabbak, mint a fény sebessége, akkor a (3.2) kifejezés nevezőjében lévő UV/c^2 tag az egységnél sokkal kisebb lesz, és a (3.2) törvény *megközelítőleg* azonos lesz a newtoni törvénnyel. Ennek megfelelően a (3.2) törvény különös hatásainak megjelenését csak akkor várjuk, amikor a fény sebességét megközelítő sebességű mozgásokat vizsgálunk.

Az egyedüli lehetőség arra, hogy a fénysebesség változatlannak tűnjön fel különböző sebességgel mozgó megfigyelők számára, az, ha a sebesség meghatározására használt, mértékül szolgáló hosszúság- és időegységek nem azonosak számukra. Ha egy rúd hosszát L-nek találjuk, amikor hozzánk képest nyugalomban van, akkor nem fogjuk ugyanolyan hosszúnak találni, amikor hozzánk képest mozgásban van. Ha hozzánk képest állandó V sebességgel mozog, akkor hosszát L^*-nak fogjuk mérni:

$$L^* = L(1 - V^2/c^2)^{1/2}. \tag{3.3}$$

Mivel V nulla és c között lehet, azt látjuk, hogy L^* mindig kisebb lesz, mint L. Vagyis a hozzánk képest mozgó rudat mindig rövidebbnek észleljük, mint akkor, amikor nem mozog hozzánk képest. Ahogyan a mozgó rúd hozzánk

viszonyított sebessége megközelíti a fény sebességét, hosszát egyre rövidebbnek és rövidebbnek észleljük. Ezt a jelenséget *relativisztikus összehúzódásnak* nevezzük. Azt jelenti, hogy nem létezik a hosszúság abszolút fogalma, amely a megfigyelőtől függetlenül létezne.

Tételezzük fel, hogy van két rúdunk, amelyek hossza teljesen azonosnak látszik, amikor egymásra fektetjük őket, vagyis amikor egymáshoz képest nem mozognak. Mozgassuk most a két rudat nagy sebességgel egymás felé. Ha az egyik rúdon ülünk, a másik relatív mozgásban van hozzánk viszonyítva, így hosszát, amikor elhalad mellettünk, az első rúd hosszánál rövidebbnek fogjuk mérni. Ha azonban egy másik megfigyelő ül a másik rúdon, akkor ő az első rudat fogja relatív mozgásban látni saját magához képest, és az első rudat fogja a másodiknál rövidebbnek mérni. *Valójában* melyik rúd a rövidebb? Nincs olyan válasz erre a kérdésre, amely nem veszi figyelembe a mérést végző megfigyelő mozgását a rudakhoz képest. A hosszúság fogalmának nincs abszolút jelentése. A legtöbb, amit tehetünk, az az, hogy gyakorlati szempontból arról a hosszúságról beszélünk, amelyet az a megfigyelő mérne, aki nincsen relatív mozgásban a rúdhoz képest. Meglehetősen egyértelmű fogalom ez, a rúd *nyugalmi hosszának* nevezik; ez a legnagyobb hosszúság, amelyet a rúdon mérhetünk.

Ez a relativitás az idő mérését is hasonlóan befolyásolja. Ha egy időszakasz órával meghatározott hosszát T-nek mérjük, amikor nem vagyunk mozgásban az órához képest, akkor ugyanazt az időszakaszt T^* hosszúságúnak fogjuk találni, ha V sebességgel mozgunk az óra felé:

$$T^* = T/(1 - V^2/c^2)^{1/2}. \tag{3.4}$$

Így tehát T^* nagyobb, mint T, vagyis a mozgó órák késnek. A relativitás ezen hatását *időtágulásnak* nevezzük. S ez megint csak azt jelenti, hogy az időnek nincsen abszolút mértéke. Életem hossza attól függ, hogy milyen gyorsan távolodom azoktól az egyénektől, akik ilyesfajta dolgokról akarnak beszélgetni velem. Ami egy adott megfigyelő számára egy nap, azt másvalaki, aki hozzá képest elég nagy relatív sebességgel mozog, ezer évnek fogja mérni. Az egyetlen egyértelmű idő az, amelyet a megfigyelőhöz képest mozdulatlan órával mérünk: ezt *saját időnek* nevezzük.

Bármilyen különösek is ezek az elképzelések a térről és időről, a szerte a világon végzett fizikai kísérletek nap mint nap bizonyítják őket. A legegyszerűbb bizonyítékot a müonok Föld felszínén való észlelése szolgáltatja. Ezeket az elemi részecskéket a kozmikus sugárzás bombázása hozza létre a magaslégkörben. Ha a tér és idő egyszerű, newtoni elképzelése igaz volna, akkor ezeket

a részecskéket sohasem észlelhetnénk a Föld felszínén. A müonok instabil részecskék, amelyek átlagosan másfél mikroszekundum alatt elbomlanak. Mivel 6000 méter magasságban keletkeznek, nem léteznének eléggé hosszú ideig ahhoz, hogy elérjék a földfelszínt, még akkor sem, ha fénysebességgel haladnának. Rövid életidejük alatt ugyanis a 6000 méteres távolságnak csak töredékét tudnák megtenni. Azt a tényt, hogy mégis észleljük őket a Föld felszínén, a relativitás hatásai magyarázzák meg. A mozgó müonon tartózkodó megfigyelő a Föld felszínét nagy sebességgel látja közeledni (a müonok a fénysebességet megközelítő $V = 0{,}999\ c$ sebességgel mozognak), így a müon és a felszín távolsága – a (3.3) egyenlet szerint – mintegy 268 méterre rövidül. A müon ezt a távolságot könnyűszerrel megteszi, mielőtt lebomlana, így a kozmikus sugárzás keltette müonokat észleljük a Föld felszínén. A jelenséget tekinthetjük a Föld felszínén tartózkodó megfigyelő szempontjából is. Ez teljesen egyenértékű az előzővel. A felszíni megfigyelő számára a müon nagy sebességgel közeledik, ennélfogva élettartama jóval hosszabb lesz, mint a felszínhez képest nyugalmi állapotban lévő részecskéé lenne. A megnövekedett élettartam – melyet a (3.4) egyenlet ad meg – a felszínen tartózkodó megfigyelő órája szerint elég időt hagy a müonnak ahhoz, hogy lebomlása előtt elérje a földfelszínt.

Hangsúlyoznunk kell, hogy a relatív téridő eme józan észnek ellentmondó tulajdonságai nem csupán illúziók, nem is a nézőpontból fakadnak, ahogyan például egy adott test különböző szögekből más és más alakúnak látszik. A nagy sebességű mozgás nem fékezi le az órákat, vagy hajlítja meg a mérőrudakat. A relativisztikus tulajdonságok olyan fogalmak, amelyek csak a mérések alapjául szolgáló mérték viszonylatában léteznek. A müonok ténylegesen elérik a Föld felszínét; ezt nem tehetnék, ha a tér és az idő a newtoni felfogásnak megfelelően abszolútak volnának.

Aggódhatnánk amiatt, hogy megtörténhet-e az, hogy én azt látom, hogy B eseményt az A esemény okozta, míg egy másik megfigyelő, aki elég gyorsan tud mozogni hozzám képest, azt látja, hogy a B esemény az A előtt következett be. Ezt, szerencsére, a (3.3) és (3.4) szabály nem engedi meg: az események időbeli sorrendje minden megfigyelő számára azonos. Az ok és okozat sorrendje megmarad. Ami azonban nem érvényes általában, az az egyidejűség fogalma. Ha két eseményt egyidejűnek észlelek, akkor egy hozzám képest állandó sebességgel mozgó megfigyelő nem fogja őket egyidejűnek látni.

Az egyidejűség fogalmának relativitása volt az első fejezetben tárgyalt operacionalizmus és instrumentalizmus nevezetű tudományfilozófiák hajtóereje. Olyan experimentalisták, mint Percy Bridgman, ráébredtek arra, hogy a tér és az idő józan észnek ellentmondó tulajdonságai, melyeket Einstein

speciális relativitáselmélete fedett fel, aláássák a hétköznapi fogalmakba vetett hitet. Ha egy olyan „nyilvánvaló" fogalomnak, mint az egyidejűség, nincsen abszolút jelentése, mert teljes mértékben a megfigyelő relatív mozgásától függ, akkor hogyan lehetnénk bizonyosak abban, hogy számos, hasonlóképpen jól ismert tudományos fogalom nem ugyanígy jelentés nélküli vagy kétértelmű? Éppen ezért Einstein és Bridgman annak szükségességét hangsúlyozta, hogy egy dolgot egyértelműen meg kell tudnunk mérni valamilyen eljárással, mielőtt elfogadnánk, hogy jelentése van.

A speciális relativitáselmélet kifejlesztése kapcsán megtanulunk néhány új, a természeti törvényekkel kapcsolatos elvet, és új elméletre teszünk szert a mozgások magyarázatára. Látjuk, hogy olyan kísérletileg igazolt törvények, mint Newton törvényei, hogyan bizonyulhatnak csak közelítőleg érvényesnek, mert az őket alátámasztó megfigyeléseket és kísérleteket a lehetséges körülményeknek csak szűk tartományában végezték el. Így a newtoni mechanikáról kiderült, hogy csak alacsony sebességek esetén érvényes közelítése a speciális relativitás elméletének. Elvesztettük a megfigyelőktől független, általános érvényű tér és idő fogalmát is. Ehelyett minden egyes megfigyelő a hozzá képest relatív mozgásban lévő más megfigyelők által észlelt tulajdonságokhoz viszonyítva határozza meg a tér és az idő tulajdonságait. A speciális relativitás elvei egy olyan csapást is kijelölnek, melyen haladva a természeti törvényeket a lehetőségek korlátozásaiként kell kifejteni, nem pedig bizonyos okok hatásaira vonatkozó közvetlen állításokként. A speciális relativitáselmélet elvei a természet *invarianciájára* vonatkozó állítások: törvényekre vonatkozó törvények.

Görbült téridő

Már ünnepünknek vége. E színészek
Szellemek voltak, mondtam, szellemek,
S a légbe tűntek, lenge légbe tűntek:
És mint a látás páraváza, majdan
A felhősipkás tornyok, büszke várak,
Szent templomok, s e nagy golyó maga,
S vele minden lakósa szertefoszlik,
S mint e ködpompa tűnt anyagtalan,
Nyomot, romot se hágy. Olyan szövetből
Vagyunk, mint álmaink, s kis életünk
Álomba van kerítve.

Shakespeare
(Ford. Babits Mihály)

A speciális relativitáselmélet, bár megszünteti a tér és az idő abszolút jellegét és ehelyett bevezeti a fénysebesség, valamint a természeti törvények invarianciáját minden egyenletes relatív mozgásban lévő megfigyelő számára, nem változtatja meg gyökeresen a tér és az idő természetéről alkotott képünket. Ez a kép azonban nem volt teljes. A jelek terjedését korlátozó kozmikus sebességhatár léte összeegyeztethetetlen volt a Newton-féle gravitációs törvénnyel. A gravitáció új leírására volt szükség, amelyben a speciális relativitáselmélet invarianciái valahogyan összefüggésbe hozhatók azzal a ténnyel, hogy az egyszerű newtoni törvény sikeresen írja le a Naprendszer dinamikáját. 1915-ben, tíz évvel a speciális relativitáselmélet közreadása után Einstein megalkotta ezt a szintézist. Új gravitációs elméletét *általános relativitáselméletnek* nevezte. Ez az elmélet számos egészen új elemet tartalmaz, amelyek minden más természeti törvénytől elkülönítik. Nem tekinthető a korábbi eszmék szükségszerű, logikus kiterjesztésének sem, mint a speciális relativitáselmélet.

Gondoljunk vissza hermetikusan lezárt laboratóriumainkra, amelyekben sok-sok tudós végzi kísérleteit a természeti törvények meghatározására. Einstein felismerte, hogy ha az egyik laboratórium a gravitáció hatására szabadesésben volna, míg a másik megfelelő mértékben gyorsulna, akkor – feltéve, hogy a laboratóriumok elég kis méretűek – a bennük tartózkodók nem tudnák meghatározni, hogy a szabadon eső vagy pedig a gyorsuló laboratóriumban vannak-e. Elég kis helyen mindig semlegesítheti a gravitáció hatását a megfelelő mértékű, ellentétes irányú gyorsulás. Mivel azonban a gravitációs tér erőssége helyről helyre változhat, a gravitáció semlegesítéséhez mindenhol más és más fokú gyorsulásra van szükség. A gravitációt nem lehet mindenütt ugyanakkora ellengyorsítással megszüntetni; mégis, megfelelő gyorsítási terek bárhol semlegesíthetnék a gravitáció hatását. Ennek alapján elképzelhető a gravitációnak olyan leírása, amelyben – kimondva – nem szerepelnek gravitációs erők.

Míg Newton a gravitációt az abszolút térben és időben elhelyezkedő különböző tömegek között ható erőnek képzelte el, Einstein ki akarta iktatni azt a newtoni elképzelést, mely szerint a tér rögzített színterén a testek „gravitációs erőknek" nevezett titokzatos távolhatásokat szenvednek el, és az erővonalak rögzítettek. Ezek helyébe nagyszámú, lokális gyorsulású tér és idő vonatkoztatási rendszer lépne, amelyekben egyáltalán nem tapasztalható erőhatás, mert gravitációs erőiket a különböző helyi gyorsulások semlegesítik. A gravitáció törvényének azt kell leírnia, hogyan szövődnek egybe mindezek a különböző gyorsuló mozgások, amelyek helyi jelleggel semlegesítik a gravitációt, míg végül létrejön nagy méretekben a tér és az idő. Mindez első hallásra meglehetősen különösen hangzik. Végül is nem ugyanaz egy nagy

tömeg mellett ülni és semmilyen tömeg mellett sem ülni. Az első esetben érzünk gravitációs vonzást, a második esetben pedig nem. Ahhoz, hogy az efféle tapasztalatokat összebékíthesse azzal az igényével, hogy kiiktassa a gravitációs erőt annak különös, azonnali távolba hatásával együtt, Einsteinnek fel kellett adnia a térről és az időről alkotott hagyományos képet.

A teret hagyományosan egyfajta kozmikus biliárdasztalnak tekintették, amelyen az anyag mozgásai lejátszódnak. Az idő e mozgások egymás után következésének egyenletes, előrehaladó mértéke. Ebben a szereposztásban a tér és az idő független a bennük zajló eseményektől. A természeti törvények azt irányítják, milyen dolgok történnek az idő*ben*, a tér rögzített biliárdasztal*án*. Einstein olyan leírást keresett, amelyben az anyag térben és időben való jelenléte szükségszerűen meghatározza a tér geometriáját és az események időbeli lefolyását.

1870-ben egy angol matematikus, William Clifford merész elméletet tett közzé, amely akkor nem keltett feltűnést. Felvetette, hogy a tér sokkal inkább hasonlít egy vidéki táj felületére, mint egy biliárdasztal tetejére. Kis dombok és völgyek tarkítják, úgyhogy csak nagy átlagban lapos. Feltételezte továbbá, hogy ez a hullámzás nem szükségképpen statikus, hanem folyamatosan haladhat helyről helyre, mint a hullámok a tenger felszínén. Véleménye szerint a tér alakjának ez a hullámzása az általunk mozgásnak nevezett jelenség lényege. A tér folyamatos áramlását valamilyen folytonossági törvény szabályozná, éppen úgy, mint a folyadékok áramlását. Kortársai közül azonban senki sem tudott mit kezdeni ezzel a furcsa látomással. Maxwell figyelmét barátja, Tait hívta fel Clifford elméletére. Maxwell egy levelezőlapon elutasítja Cliffordnak a Riemann-féle nem-euklidészi geometriára alapozott térelméletét, mert ellentmond az abszolút térről alkotott felfogásának, mely szerint az abszolút tér olyan színtér, ahol a koordináták a benne definiált erőterek jelzőtáblái. Einsteinnel ellentétben ő nem úgy gondolta, hogy az erővonalak definiálják a tér geometriáját. Sietősen firkantja Taitnek:

> a tér-gyűrögetők célja, hogy a tér görbületét egyformává tegyék mindenütt, azaz a tér egészében, akár nagyobb, akár kisebb az egész a végtelennél. A görbület *iránya* nincs szorosabb kapcsolatban egyik *x*, *y*, *z* koordinátával sem, mint a másikkal, vagy az *-x -y -z* koorodinátákkal, így, amennyire értem, megint csak vakon hajózunk, csillagok, szél és irány nélkül.

Einstein képes volt arra, hogy új gravitációs elméletének megalkotásához kidolgozza egy ilyesfajta elképzelés matematikai részleteit. Titokzatos gravitációs erők helyett, amelyek a lapos térben tömegeket vonzanak egymáshoz, fel-

vetette, hogy a tömegnek vagy az energia valamely más formájának a jelenléte a térben eltorzítja annak geometriáját, pontosan úgy, mintha a már említett biliárdasztal lapját rugalmas lappal helyettesítenénk. Így ott, ahol nagy tömegek vannak, a térben mély gödrök keletkeznének, míg azokon a helyeken, ahol nincs tömeg, a tér csaknem teljesen sima lenne, a felszínen máshol található bemélyedések enyhe hatásától eltekintve. A tömeg jelenléte az idő folyását is befolyásolná, azaz tömeg jelenlétében az óra lassabban járna.

Newton első törvénye szerint az egyenes vonalú mozgást végző testekre nem hat erő. Ilyen testek azonban nem léteznek: minden testre hatnia kell a többi test gravitációs erejének, ezért a csak gravitáció hatása alatt végbemenő mozgást természetesebb alapállapotként elfogadni, mint az erőhatás nélküli mozgást. Ha a tömeg gravitációs hatását az magyarázza, hogy görbületet hoz létre a térben, akkor az a mozgás, amely más erőhatások teljes hiányában az ilyen módon görbült térben játszódik le, a síkbeli egyenes vonal megfelelője egy görbült felületen. Ez az „egyenes vonal" sima felszínen egyszerűen két pont között a legrövidebb út. Tudjuk, hogy ha görbült felszínen a legcélszerűbb módon akarunk utazni, akkor két pont között a legrövidebb út nem egyenes vonal lesz. Ha például Londonból San Franciscóba akarunk repülni, a Föld görbült felszínén a legrövidebb út a gömbi főkör íve mentén vezet, amely az Északi-sark közelében elhaladva Észak-Amerika nyugati partja mentén dél felé fordul. A görbült felszíneken meghatározható legrövidebb utakat geodétikus vonalaknak nevezik.

Az erőhatásoknak nem kitetten mozgó test a téridő gumilepedőjén a geodétikus útvonalon halad. Ha a téridőben nem helyezkedik el semmilyen tömeg, akkor a lepedő felszíne sík marad, és a test geodétikus útvonala egyenes vonal lesz. Ha azonban valamilyen nagy tömeg van a téridőben, mély horpadást idéz elő a geometriában, úgyhogy amikor a mozgó test áthalad ezen az árkon, a geodétikus útvonalat követi a görbült felületen, éppen úgy, mint ahogyan a hegyi patak is a geodétikus utat követi, amint forrásától a tenger felé kanyarog. A térben képződött árok hatása abban nyilvánul meg, hogy a test a nagyobb tömeg felé mozdul el, de ezt csak azért teszi, mert *lokálisan* a geodétikus útvonalat követi, nem pedig azért, mert a távoli tömegből valamilyen távolra ható erő sugárzik feléje. Itt most nincs is a régi értelemben vett távoli tömeg, csak torzulás a téridő geometriájában. Ily módon a testek mozgását nagy hatótávolságú gravitációs erők helyett a téridő helyi alakulása irányítja, amelyet viszont a tömegeknek a téridőben való jelenléte határoz meg. Csakúgy, ahogyan a hegyi patak útjának kanyarulatait annak a területnek a *helyi* lejtése jelöli ki, amelyen történetesen áthalad, a testek téridőben való mozgását az éppen soron következő útszakasz *helyi* görbülete határozza meg.

Nincsenek gravitációs erők; nincs távolról előidézett, azonnali hatás; nincsen a benne létező tárgyaktól független, abszolút tér és idő. John Wheeler szavaival: „A tér megmondja az anyagnak, hogyan mozogjon. Az anyag megmondja a térnek, hogyan görbüljön." A tömeg és az energia nem más, mint ráncok a tér geometriájában.

Einstein legnagyobb eredménye az volt, hogy felállította azt a hallatlanul bonyolult matematikai egyenletrendszert, amely megmutatja, hogyan határozzuk meg az anyag és a téridő geometriája közti kölcsönös viszonyt. Egyenletei, Poisson és Laplace egyenleteihez hasonlóan, téregyenletek. Minden esetben, amikor a görbült téridő elméletének szokatlan előrejelzéseit megfigyelésekkel ellenőrizték, az eredmény nagy pontossággal egyezett a számításokkal.

A sikeres előrejelzésre tett fenti utalás jelentősége Einstein gravitációs elmélete esetében a szokásosnál is nagyobb. Elméletéhez nem lehet kizárólag megfigyelések alapján eljutni: olyan elemeket is tartalmaz, amelyek mai tudásunk szerint nem feltétlenül igazak. Nevezetesen, mindazon geometriák közül, amelyek a téridő anyag és energia okozta torzulásait leírhatják, Einstein azt a speciális geometriát választotta, amelyet először Riemann, Gauss egyik göttingeni tanítványa tanulmányozott módszeresen. Ez csupán feltételezés, hipotézis volt, ellentmondhatott volna a megfigyeléseknek. Nincs ismert oka annak, miért kell a világnak görbült geometriával kifejezhetőnek lennie éppen olyan módon, hogy enyhe görbületeknél úgy tetsszék, mintha a Newton szerinti négyzetesen csökkenő erő törvényének engedelmeskednék.

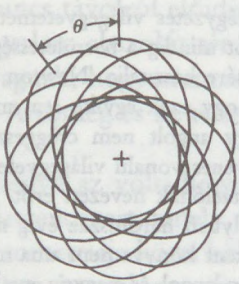
George Bernard Shaw, amikor felkérték, hogy vacsora után pohárköszöntőt mondjon Einstein tiszteletére, szórakoztatóan és érzékletesen foglalta össze, hogyan lett a gravitációs erőkből a tér görbülete, ellentétben a newtoni abszolút térben ható, négyzetesen csökkenő erővel. Titkára feljegyzése szerint a shaw-i pohárköszöntő a következőképp hangzott:*

*Shaw erre a témára *Olyan igaz, hogy nem is lehet szép* c. 1934-ben kiadott drámájában is kitér, ahol felpanaszolja, hogy „... Isaac Newton világegyeteme, amely háromszáz éven át volt a modern civilizáció bevehetetlen fellegvára, úgy dőlt romba Einstein kritikájától, mint Jerikó falai. Newton világegyeteme a racionális determinizmus erődje volt... Mindent ki lehetett számítani: minden azért történt, mert meg kellett történnie; a törvénytáblákról letörölték a tízparancsolatot, és helyébe lépett a kozmikus algebra: a matematikusok egyenletrendszere" (Ford. Réz Ádám).

> Newton, angol lévén, négyzetes világegyetemet vett alapul, mert az angol nyelv a „négyzetes"* szót mindig a becsületesség, szavahihetőség, egyszóval az egyenesség megjelölésére használja. Newton tudta, hogy a világegyetem mozgó testekből áll, s hogy ezek egyike sem mozog – nem is mozoghat – egyenes pályán. Ám egy angolt nem csüggesztenek el a tények. Annak magyarázatára, hogy egyenes vonalú világegyetemében miért görbe minden vonal, feltalált egy gravitációnak nevezett erőt, majd bonyolult angol világegyetemet alkotott, amelyben háromszáz évig mindenki vallásos tisztelettel hitt. A newtoni vallás szent könyve nem ama mágikus keleti tárgy, a Biblia volt, hanem ama nagyon angol és nagyon gyakorlatias kötet, a Bradshaw [angol vasúti menetrend]. Ez megadja minden égitest megállóhelyeit, távolságukat, utazásuk sebességét, fogyatkozásaik vagy földre hullásuk időpontját. Minden tétel pontos, ellenőrzött, abszolút és angol. Háromszáz évvel e vallás megalapítása után Európa közepén higgadtan feláll egy ifjú professzor, és így szól csillagászainkhoz: „Uraim: ha gondosan megfigyelik a következő napfogyatkozást, magyarázatot tudnak majd adni a Merkúr-pálya napközelpontjának rendellenességére." ... Az ifjú professzor mosolyog, és azt állítja, hogy a gravitáció fölöttébb hasznos hipotézis, és legtöbb esetben meglehetősen pontos eredményeket ad, de hogy ő személy szerint elvan nélküle. Megkérik, magyarázza meg, hogy ha nincs gravitáció, akkor az égitestek miért nem mozognak egyenes pályán, és miért nem száguldanak ki a világegyetemből. Azt feleli, hogy magyarázatra nincs szükség, mert a világegyetem nem egyenes vonalú és nem kizárólag angol, hanem görbe vonalú. A newtoni világegyetem erre holtan rogy össze, és az einsteini világegyetem lép a helyébe. Einstein nem a tudomány tényeit, hanem a tudomány alapigazságait támadta meg, és a tudomány megadta magát a kihívásnak.

A Merkúr bolygó napközelpontja (perihélium) azért említtetik, mert 1900-ra ráébredtek arra, hogy eltérés van a Merkúr bolygó megfigyelt pályája és a newtoni gravitációs elmélet tömegvonzási törvénye alapján számított előrejelzés között. A Merkúr, a többi bolygóhoz hasonlóan, nem tökéletesen zárt, ellipszis alakú pályán mozog a Nap körül. Ha a bolygóra kizárólag a Nap által gyakorolt erő hatna, a pálya Newton szerint zárt ellipszis lenne, a gyakorlatban azonban enyhe zavaró hatások (perturbációk) érik a Naprendszer minden más égiteste részéről. Az eredmény – olyan pálya, amely nem teljesen zárt, hanem nagyon lassan körbefordul a 3.8 ábrán látható rozettaalakban. Az egymást követő pályák szélső pontjai (a perihéliumok) által bezárt szöget a perihélium elfordulási szögének nevezik.

*Lefordíthatatlan szójáték: a „square" jelentése ugyanis 'négyzetes' (és 'négyszögletes'), illetve 'egyenes' – derék, szavahihető értelemben. A Newton-féle tömegvonzási törvény pedig angolul „inverse square law". – *A ford.*



3.8 ábra. „Rozetta" pálya, amely tíz kör után bezárul. A körök legkülső pontja (a perihélium) egy kör megtétele alatt a jelzett szöggel halad előre

Bárhogy is próbálták a csillagászok, nem tudták pontosan kiszámítani a Merkúr perihéliumának értékét. Az elfordulási szög évszázadonkénti tényleges (megfigyelt) elfordulási értékéből 43 szögmásodpercnyi többletet nem lehetett a perturbációk hatásával megmagyarázni. Az *Encyclopaedia Britannica*ban a XIX. század végén megjelent egyes cikkek még Newton tömegvonzási törvényének *ad hoc* módosítására is javaslatot tesznek, amely indokolná az eltérést. Az általános relativitáselmélet legnagyobb sikere az volt, hogy pontosan megmagyarázta ezt az eltérést. A térben a Nap jelenléte által előidézett görbületnek a következménye, hogy amint a Merkúr geodétikus útvonalát követi a görbült téridőben, a perihélium elfordulási szögében évszázadonként 43 szögmásodperc többlet keletkezik.

Einstein gravitációs elmélete nem pusztán Newton elmélete más szemszögből nézve. Newton elmélete helytelenül írja le a mozgó testek viselkedését erős gravitációs erőtérben, ahol a téridő erősen görbült. A viszonylag gyenge gravitációs erőterek világában, amilyenben a Föld felszínén élünk, természetesen megfelelő. Ilyen körülmények között Newton elmélete nagyon jól közelíti Einsteinét, ami egy másik hasznos tanulság. Évszázadokig használhatunk egy természeti törvényt anélkül, hogy ellentmondásra vezetne, teljes metafizikai világképet építhetünk rá a természet mechanikus működéséről, és mégis kiderülhet, hogy csupán töredék része egy óriási és teljesen különböző rendszernek.

Egy másik érdekes vonása is van annak az óriási lépésnek, amely az anyag és mozgás newtoni képétől az einsteinihez vezet. Newton törvényeinek nemcsak a formája változott meg, hanem alapvető fogalmainak, a tömegnek, a hosszúságnak, az időnek a *jelentése* sem lesz soha többé ugyanaz. E változás valódi mértéke nem nyilvánvaló, mert az ezeket a létezőket leíró szavak ugyanazok maradtak. A legfigyelemreméltóbb dolog az, hogy Einstein rend-

kívül éleselméjű felismerését, amely az általános relativitáselmélet megalkotásához vezetett, nem megfigyelések váltották ki: semmilyen válság nem pattant ki, ellentmondó kísérleti tény sem merült fel, ami miatt Newton törvényeivel ne lehetett volna tovább együtt élni. A perihélium precessziójának rendellenességét akkoriban inkább jelentéktelen bosszúságnak tekintették, mintsem új gravitációs elméletet követelő, alapvető problémának. Nem volt kuhni értelemben vett paradigmaváltás (lásd a 7. fejezetben). A világ többi fizikusa más, egészen különböző problémákkal volt elfoglalva. Einstein felismerésének intuitív mélysége fölöslegessé tett egy forradalmat, és újszerűsége még most is elkülöníti a többi természeti törvénytől.

Invariancia

> Valóban, ha felfedeznék az univerzális természeti törvényt, az invariancia-elvek pusztán az ezt a törvényt változatlanul hagyó matematikai transzformációkká válnának.
>
> Wigner Jenő
> (Ford. Györgyi Géza)

A sztálinizmus időszakában a Szovjetunióban az állami szervek politikai okokból Einstein számos fizikai tételét támadták (bár a fizikát az ideológusok inkább megtűrték, mint egyéb területeket, különösen a biológiát). Úgy látszik, a speciális relativitáselmélet legfelforgatóbb állításának azt a népszerű értelmezését tekintették, mely szerint „minden relatív". Némi gondolkodás után nyilvánvaló, hogy ez a hatásvadász újságírói kifejezés értelmetlen, mégis néhány szovjet fizikus a politikai fenyegetések hatására ügyesen azt hangsúlyozta, hogy Einstein elméletét helyesebb volna az „invariancia elméletének" nevezni a „relativitás elmélete" helyett. A *relativitás* megfelelő kifejezés a térben és időben észlelt dolgok jellegének leírására: hosszúságuk, élettartamuk és tömegük olyan mérhető tulajdonságok, melyek csak a megfigyelők bizonyos csoportjára hivatkozással értelmezhetők; e megfigyelőket a mérni kívánt dologhoz viszonyított relatív sebesség definiálja. De annak oka, hogy különböző megfigyelők eltérő hosszúságokat és időtartamokat mérnek, az, hogy két dolog *nem* relatív: a fény sebességét ugyanakkorának mérjük a megfigyelő mozgásállapotától függetlenül, és a fizika törvényei az egymáshoz képest állandó sebességgel mozgó laboratóriumokban egyformák. Vagyis e két dolog *invariáns* bizonyosfajta változások során. A természet relativisztikus törvényeit ama feltevés alapján nyerjük, hogy a természet tartja magát néhány invarianciaelvhez.

Ideális esetben annak leírása, hogy miképpen működik a természet, nem függhetne attól, hogy ki írja le. Ha függene, akkor nem tudnánk másokkal egyértelmű módon beszélni a világ szerkezetéről. És miután nincs olyan érv, melynek alapján egyes megfigyelők nézeteit másokénál többre kellene értékelnünk, az a kívánatos, hogy olyan természeti törvényeink legyenek, amelyek formája nem függ a megfigyelőtől, aki megalkotja őket. Ez a követelmény egyszerűnek és nyilvánvalónak látszik, de kiderül, hogy messzire ható és mély következményei vannak. Annyi különböző mód van, ahogyan a természeti törvények formája a megfigyelő mozgásállapotától *függhetne*, hogy az ellenkezőjének megkövetelése e törvényeket szövevényes módon korlátozza. Rendkívül sajátos formát kényszerülnek ölteni. Vegyük észre, hogy most azt állítjuk, hogy a különböző megfigyelők a *törvényeket* fogják egyformának találni. Nem szükséges, hogy a törvényekben szereplő mennyiségek értékét ugyanakkorának találják. Így például mind arra a következtetésre jutnak, hogy az impulzus megmarad két részecske ütközése során, annak ellenére, hogy a relativitás miatt eltérő sebességeket és tömegeket észlelnek. A törvényekkel ellentétben csak egyetlenegy olyan észlelt mennyiség van, melynek értékében megegyeznek: a fénysebesség az összes megfigyelő számára azonos, bár a mért távolságok és időtartamok, melyek alapján a fénysebességet kiszámítják, eltérőek lehetnek. A tanulság az, hogy a megfigyelőtől való függetlenség az események közötti összefüggésekre vonatkozik, nem pedig magukra az eseményekre.

Einstein rendkívül fontosnak tekintette a természettörvényeknek az összes megfigyelő számára azonos, matematikai formában való kifejezését. Newton mozgástörvényeinek nincs meg ez a tulajdonságuk. A második törvény, egy m tömegű testre vonatkoztatva, azt állítja, hogy a rá ható F erő A gyorsulással fogja mozgatni:

$$F = mA \tag{3.5}$$

De nem az *összes* megfigyelő fogja ezt a törvényt észlelni. Csak a megfigyelők egy sajátos, néha *inerciális* megfigyelőnek nevezett, állandó sebességgel mozgó csoportja fogja (3.5)-öt érvényesnek találni. Tegyük fel, hogy egy másik, az inerciális megfigyelőkhöz képest A^* gyorsulással mozgó megfigyelő méri az erőt és az általa okozott gyorsulást. Azt fogja találni, hogy a mozgástörvény formája

$$F = m(A + A^*), \tag{3.6}$$

és nem (3.5).

Ugyanilyen, a megfigyelők egy sajátos csoportjára való korlátozás vonatkozik az első törvényre is, arra ugyanis, hogy az erőhatástól mentes testek állandó sebességgel mozognak. Ha egy műhold az űrben, a csillagok és bolygók gravitációs hatásától messze mozog, akkor egy inerciális megfigyelő azt észlelné, hogy egyenletes sebességgel mozog. Ha azonban ezt a holdat egy forgó rakétából figyeljük meg, akkor azt látnánk, hogy a műhold pályája a rakéta körüli csavarvonal. A pálya egyenes vonaltól való eltérését látva tévesen arra a következtetésre jutnánk, hogy külső erők hatnak rá. Megint szembesültünk azzal a ténnyel, hogy Newton törvényei nem alkalmazhatók közvetlenül a gyorsuló mozgásban lévő megfigyelő észleléseire. A műhold mozgástörvényének további tényezőket kell tartalmaznia a megfigyelők változó (gyorsuló) mozgásának vagy forgásának ellensúlyozására. Ezeket a korrekciókat Coriolis-„erőknek" nevezzük, a XIX. századi francia fizikus, Gustave de Coriolis tiszteletére. Képzelt erők ezek, és bevezetésük azt a célt szolgálta, hogy Newton mozgástörvényei érvényesek maradjanak forgó vonatkoztatási rendszerből tett megfigyelések esetén is.

Einstein a dolgok ilyetén állását nem tartotta kielégítőnek. A természeti törvényeket olyan alakban kellene kifejezni, hogy *bármely* megfigyelő számára azonosak legyenek. Ezt a követelményt nevezte a *kovariancia elvének*:

> A természet általános törvényeit olyan egyenletekkel kell kifejeznünk, amelyek bármely koordináta-rendszerben érvényesek maradnak, vagyis bármiféle elképzelhető helyettesítéssel szemben kovariánsak.

Ez semmilyen értelemben sem természeti törvény, csupán egy fontos vezérlő elv a törvények kifejezésére. Bármilyen, differenciálegyenletek formájában megadott mozgástörvény kovariáns formába hozható bonyolult műveletekkel, annál bonyolultabbakkal, minél kevésbé kielégítő az eredeti törvény*.

Einstein hosszú évekig küzdött speciális relativitáselméletének olyan formába öntéséért, amely teljesen kovariáns. E célját barátja, Marcel Grossman (akit diákkora óta ismert) segítségével érte el. Grossman tehetséges matematikus volt, aki Einsteint bevezette a tiszta matematika olyan területeire, amelyek célja eléréséhez ideálisnak bizonyultak.

*Ha azt követeljük meg, hogy a természettörvények rendelkezzenek egy ennél erősebb *„invariancia"*-tulajdonsággal, vagyis hogy kovariánsak legyenek, *és* az összes olyan matematikai mennyiség, amely az anyagtól független (például egyes koordinátaváltozók más koordinátaváltozók szerinti deriváltjai), változatlan maradjon, akkor specifikus egyenleteket választunk ki.

A XIX. században a matematikusok befejezték a matematikai konstrukciók *tenzoroknak* nevezett csoportjának vizsgálatát. A tenzorokat (amelyek a skaláris és vektormennyiségek sajátos esetei) a leírásukra alkalmazott koordináta-rendszer megváltozásakor mutatott transzformációs tulajdonságaik jellemzik. Azzal a tulajdonsággal rendelkeznek, hogy ha bármely, tenzorokra vonatkozó egyenlet igaz az egyik koordináta-rendszerben kifejezve, akkor *ugyanilyen formában* igaznak kell lennie bármely más koordináta-rendszerben. Einstein felismerte, hogy ha a természeti törvényeket mindig tenzoregyenletek formájában adnánk meg, akkor amennyiben az egyik megfigyelő egy törvényt például az alábbi alakúnak talál:

$$S = T, \tag{3.7}$$

annyiban egy másik, az előzőhöz képest tetszőleges módon mozgó megfigyelő, ha megméri a törvényben szereplő két mennyiség értékét, azokat S^*-nak és T^*-nak fogja találni, úgyhogy

$$S^* = T^*. \tag{3.8}$$

Bár S és T eltér S^*-tól és T^*-tól, az összefüggésüket kifejező törvény azonos formájú a (3.7) és (3.8) egyenletben. Ez pedig ellentétben áll a (3.5) és (3.6) egyenletek esetével, ahol a megfigyelők második (nem inerciális) csoportja eltérő formájú törvényt talált. A tenzoregyenletek e tulajdonságából fakad, hogy automatikusan kielégítik azt a feltételt, hogy a természeti törvények leírása semmilyen módon sem függhet az őket leíró megfigyelőktől. Nincs speciális koordináta-rendszer, nem létezik kitüntetett megfigyelő, akinek az egész természet egyszerűnek tűnne föl. Ám ez nem jelenti azt, hogy ne lennének speciális koordináta-rendszerek, melyek az egyedi jelenségek leírását megkönnyítenék, csak azt, hogy nincs olyan, amely az *összes* problémát leegyszerűsítené.

Ezek a fejlemények egy másik szempontból is érdekesek. Korábban, Einstein munkássága előtt a tudósok meglehetősen jól körülhatárolt matematikai eszközrendszert használtak. Az alkalmazott matematikában nem használták ki a „tiszta" matematika eredményeit. Az általános relativitáselmélet a tenzorok és a görbült felületek Riemann-féle geometriájának alkalmazása révén az első olyan fizikai elmélet volt, amely felhasználta a magas szintű tiszta matematikát, amelyet a matematikusok az alkalmazástól függetlenül dolgoztak ki. Míg Newton maga alkotta meg matematikájának jelentős részét a fizikai problémák megoldására, Einstein mások által alkotott logikai szerkezeteket

használt, és azt találta, hogy csodálatosan idomulnak kívánalmaihoz. Ha a tiszta matematika nem akkor és nem olyan irányban fejlődött volna, Einstein nem alkothatta volna meg gravitációs elméletét.

Szimmetria

A tényekkel az a baj, hogy annyi van belőlük.

Samuel McChord Crothers

A természet működésének megfejtése során érvényesült egy általános tendencia. Először nem tudtunk többet tenni, mint felsorolni a megtörtént eseményeket. Az ősöktől örökölt csillagászati adatok halmaza e szokás egyik üdvözlendő eredménye. A megfigyelések korai szakaszában a figyelem a természet rendellenességeire, különös vonásaira irányult, akár fogyatkozások vagy meteorok, akár más jelenségek voltak azok. Későbbi korokban a természet rendszeres voltának egyre fokozódó felismerését és kihasználását látjuk, ami a természeti törvények fogalmának megalkotásához vezetett. A következő lépés e törvények legegyszerűbb formájának keresése és olyan elvek felkutatása volt, melyek alkalmazása törvények egész sorát hozza létre. Ily módon a törvényeket szinte úgy kezeljük már, mint azokat az eseményeket, amelyeket irányítanak.

A természeti törvények a változások törvényei. Megmondják, hogyan mozognak a testek különböző erők hatására vagy bizonyos adott körülmények között. Ha a dolgok mozgását nem szabályoznák ilyen törvények, akkor az tetszőleges módon változhatna. Az a tény, hogy a lehetséges változások nem tetszőlegesek, azt jelenti, hogy valami változatlan marad a törvénynek megfelelő változások során. Azt mondjuk, hogy a jelenségben *invariancia* tapasztalható. A természeti törvények nagyrészt nem mások, mint a természet változatlan elemeinek katalógusai. Az ilyen változatlan tulajdonságokat *megmaradó mennyiségeknek* nevezzük, azokat az állításokat pedig, melyek szerint e mennyiségek a természetben állandóak maradnak, *megmaradási törvényeknek*. Ez az elképzelés átvihető azokra az egyszerű játékokra is, amelyeknek a játékszabályok által meghatározott, saját mikrovilágúk van. Így például a sakkban a bábok mozgását meghatározó „törvényeken" alapuló invarianciák vannak: a futár által elfoglalható mezők színe mindig ugyanaz.

Annak hangsúlyozása, hogy a természeti törvények mely dolgokat hagynak változatlanul, ahelyett, hogy miképpen történnek a változások, modern fejlemény. Végső soron ez annak a nézetnek az elfogadásához vezet, mely szerint a természettörvények nem mások, mint azon dolgok katalógusai, amelyeket a világ meg-

változtatása nélkül megtehetünk. A következő fejezetben látni fogjuk, hogyan teljesedik ki e megközelítés az elemi részecskék vizsgálata során.

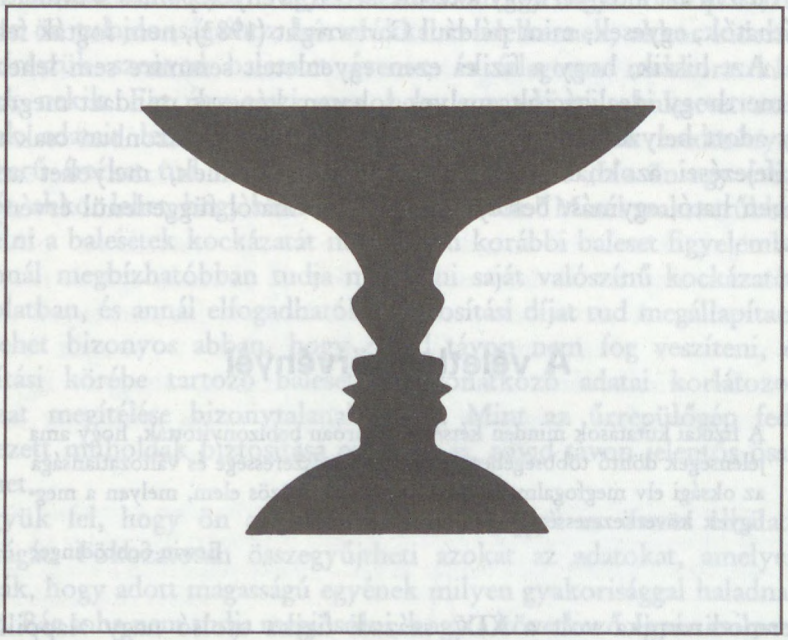
Azok a szavak, amelyeket egy adott invariancia megmaradó mennyiségének leírására használtunk, fölöttébb hasonlóak azokhoz, amelyeket arra használnánk, hogy egy mintázat szimmetriáját leírjuk. Akkor mondjuk, hogy valami szimmetrikus, amikor az a dolog – látszólagos sokfélesége ellenére – valamilyen sajátos harmóniát vagy egységet tartalmaz. Ez a harmónia kellemes az emberi szem számára, amint ezt jól bizonyítják a házaink (legalábbis egyesek házának) falát díszítő minták. Ha figyelmünket a legegyszerűbb típusú szimmetrikus mintázatra irányítjuk (3.9 ábra), felismerhetjük, hogyan keletkezik a harmónia: a minta egyik oldala tükörképe a másiknak.

Természetes kapcsolat van e tükörszimmetria és az invariancia elképzelése között. Ha ugyanis a 3.9 ábra egyik oldalát a másik oldal tükörképével helyettesítjük (mondjuk úgy, hogy az ábra függőleges középvonalához tükröt illesztünk), akkor az ábra változatlan marad. Azt mondjuk, hogy a minta invariáns az erre a tengelyre való tükrözésre. Könnyű olyan példákat elképzelni, melyekben a mozgatással szembeni invariancia a geometriai szimmetria következménye. Ha egy gömböt a középpontján áthaladó függőleges tengely körül forgatunk, alakja változatlannak tetszik. Ez egy forgással szembeni invariancia. Azért is érdekes példa ez, mert ugyanilyen invariancia tapasztalható, ha a megfigyelő kering a mozdulatlan gömb körül. Ám ez nem igaz a 3.9 ábrán bemutatott példában, mert nem létezik a megfigyelőnek olyan mozgása, amely a tükörszimmetriát utánozná.

Egyszerű példáink megmutatják a szimmetria és az invariancia kapcsolatát. Olyan kapcsolat ez, mely bármely invariancia esetében igaznak bizonyul, ámbár a megfelelő szimmetria meglehetősen rejtett lehet. A szimmetriák és invarianciák legegyszerűbb és legfontosabb párosításai a következők:

Természeti törvény, amely az alábbi változással szemben invariáns	*Megmaradó mennyiség*
térbeli mozgás	impulzus
időbeli mozgás	energia
térbeli elforgatás	perdület

Ezek a gyönyörű összefüggések felfedik, milyen mértékben épült be – akaratunktól függetlenül – egy mély szimmetria a Newton által alkotott törvényekbe. Az elsődleges megmaradási törvények annak a ténynek a következményei, hogy a természeti törvények függetlenek a megfigyelés helyétől, irányától és idejétől.



3.9 ábra. Példa olyan mintázatra, mely a középpontján áthaladó, függőleges tengelyre nézve tükörszimmetrikus

A szimmetriák és invarianciák szimbiotikus kapcsolata olyannyira hatással volt a tudósokra, hogy a szimmetriák kifejezését többre értékelték, mint a hagyományos egyenleteket, amelyek megmondják, hogyan változnak a dolgok. Mi lehet egyszerűbb annál a természeti törvénynél, amely azt mondja ki, hogy *semmi sem változik?* Annak megértése, hogy a természetben mely szimmetriák maradnak meg, elvileg lehetővé teszi a természetben bekövetkező változások törvényeinek kikövetkeztetését. Amint látni fogjuk azonban, a természet nem tett mindent ilyen egyszerűvé. Kiderül, hogy a természetben számos *majdnem*-szimmetria létezik, melyekről hosszú ideig, mielőtt igen pontos kísérleteket végeztünk volna, azt gondoltuk, hogy teljesek (szabatosak). Még inkább zavaró, hogy a szimmetrikus törvények nem feltétlenül eredményeznek olyan eseményeket, amelyek ugyanazt a szimmetriát mutatják. A mozgástörvények nem tüntetnek ki egyetlen irányt sem másokkal szemben, tegyünk azonban egy gömböt egy kúp csúcsára, bizonyosan le fog esni egyik vagy másik irányban. Az összes irány egyformán valószínű, egyiknek sincs különleges jelentősége, de ezt a szimmetriát elrejti az egyes esetekben észlelt tényleges mozgás, amely a törvény által megengedett bármelyik esetet képviselheti.

Úgy látszik azt a tényt, hogy a természeti törvények *pontos* szimmetriákkal azonosíthatók, egyesek, mint például Cartwright (1983), nem fogták fel kellőképpen. Azt hiszik, hogy a fizika ezen egyenleteit semmire sem lehet alkalmazni, merthogy idealizációk, melyek sohasem képesek mindazt megragadni, ami egy adott helyzetben történik. Ezek az egyenletek azonban csak másodlagos kifejezései azoknak a pontos invarianciaelveknek, melyeket az adott helyzetben ható, egymást befolyásoló erők számától függetlenül érvényesnek tartunk.

A véletlen törvényei

> A fizikai kutatások minden kétséget kizáróan bebizonyították, hogy ama jelenségek döntő többségében, amelyek rendszeressége és változatlansága az oksági elv megfogalmazásához vezetett, a közös elem, melyen a megfigyelt következetesség alapul: a véletlen.
>
> Erwin Schrödinger

A termodinamika volt a XIX. századi fizika utolsó nagy alappillére. A természet addig megismert egyéb törvényeitől eltérően ugyanis nem tartalmaz arra vonatkozó állításokat, hogy miképpen fognak az egyedi részecskék bizonyos erők hatására válaszolni. Nincs kapcsolatban szimmetriákkal vagy invarianciákkal, s inkább részecskék teljes csoportjainak viselkedéséről vall. És ahelyett, hogy azt mondaná „ha..., akkor ...", azt mondja, hogy „ha..., akkor esetleg ...".

E bevezetés alapján a termodinamika nem látszik különösebben megbízható eszköznek. Tegyük fel, hogy valaki üzleti vállalkozását valamiféle olyan döntési rendszer alapján vezetné, amely nem lehet pontosabb, mint a „ha..., akkor esetleg ...". Ugye csaknem bizonyos, hogy egy ilyen vállalkozás gyorsan a csőd felé tartana?

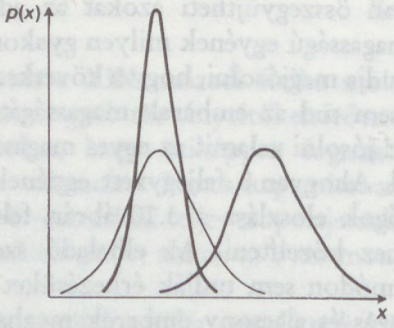
És mégis, a világon létező legjövedelmezőbb vállalkozások közül néhány az ilyen „esetleg"-ek igen magas számából alkotott rendszeren alapul. A nagy biztosítótársaságoknak sikeresen ki kell tudniuk használni a véletlen törvényeit talpon maradásuk érdekében. Nyilvánvaló sikerük a bizonyíték arra, hogy ez milyen hatékony lehet. Egy biztosítási ügynök, mikor megköti önnel a biztosítást, nem tudja megjósolni, hogy az ön autóját mikor éri majd baleset. Nem is létezik olyan természeti törvény, amelynek alapján ilyen jóslást tehetne. Amit azonban megtehet, az az, hogy meghatározza annak *valószínűségét*, hogy egy önnel azonos nemű, korú és vezetési gyakorlattal rendelkező

egyén balesetet szenvedjen. Vagyis, ha adva van egy nagyobb csoport, melynek tagjai az ön tulajdonságaihoz hasonlókkal rendelkeznek, akkor kideríti, hogy hányadrészük szenved balesetet évente, és átlagosan mekkora kártérítést fizetnek nekik. Ezt úgy teszi meg, hogy megtekinti a balesetet szenvedett egyének adatait leíró statisztikai táblázatokat, s ennek eredményeképpen számszerű értéket tud rendelni ehhez az állításhoz: „Ha ön egy évig vezeti kocsiját, akkor lehet, hogy balesetet fog szenvedni." Minél szakszerűbben tudja megítélni a balesetek kockázatát nagyszámú korábbi baleset figyelembevételével, annál megbízhatóbban tudja megítélni saját valószínű kockázatát önnel kapcsolatban, és annál elfogadhatóbb biztosítási díjat tud megállapítani. Soha nem lehet bizonyos abban, hogy rövid távon nem fog veszíteni, és ha a biztosítási körébe tartozó balesetekre vonatkozó adatai korlátozottak, a kockázat megítélése bizonytalanabb lesz. Mint az űrrepülőgép fedélzetén elhelyezett műholdak biztosítása esetében is, rövid távon jelentős összegeket veszíthet.

Tegyük fel, hogy ön az utcán áll, és feljegyzi az összes elhaladó férfi magasságát. Fokozatosan összegyűjtheti azokat az adatokat, amelyek megmondják, hogy adott magasságú egyének milyen gyakorisággal haladnak el ön mellett. Bár soha nem tudja megjósolni, hogy a következő egyén milyen magas lesz, és talán semmit sem tud az emberek magasságát meghatározó élettani okokról, mégis meg tud jósolni valamit az egyes magasság-tartományokba eső egyének gyakoriságáról. Ahogyan a feljegyzett egyének száma egyre nő, úgy fog a relatív gyakoriságok eloszlása a 3.10 ábrán feltüntetett, jellegzetesen „harang" alakú görbéhez közelíteni. Az elhaladó személyek között nincs kapcsolat. Semmilyen módon sem tudják érkezésüket úgy egyeztetni, hogy biztos legyen: ön a magas és alacsony emberek meghatározott arányát fogja észlelni. Mindazonáltal minél nagyobb az elhaladók száma, annál pontosabb lesz az egyezés magasságuk eloszlása és a harang alakú görbe között. Annak oka, hogy statisztikai jóslásokat tehetünk a magasságok eloszlására – jóllehet az egyes személyek magasságát biztonsággal nem tudjuk megjósolni –, az, hogy minden egyes személy magassága teljesen független más személyekétől, vagyis a különböző egyének magassága közti összefüggés teljes hiánya teszi lehetővé, hogy az eloszlást általánosságban megjósoljuk. Néha persze a véletlenszerű eloszlás rendellenességeket fog mutatni. Időnként egy azonos magasságú ikerpár haladhat el mellettünk, alkalmanként egy kosárlabdázó és egy törpe. Hosszú távon azonban ezeket az eltéréseket a véletlenszerűen megjelenő közönséges egyének kiegyenlítik. Minél hosszabb a megfigyelés időtartama, annál pontosabb az egyezés a harang alakú görbével. Az ehhez hasonló véletlen folyamatok nem minden esetben eredményeznek azonos alakú harang-

görbét. A görbék különbözni fognak csúcsaik helyzetében és szélességükben. A csúcs helyzetét a tipikus érték (melyet „átlagnak" nevezhetünk) határozza meg, a szélességet pedig a megfigyelt eseménysorozat hajlama az átlagtól való erős eltérésre.

Példánk alkalmas annak szemléltetésére, hogy egyes törvények *statisztikai* módon érvényesülnek. Véletlenszerű események összefűzése nagymértékű rendszerességhez vezethet. Ezek a törvények függetlenek az eseménysorozatot alkotó dolgok közelebbi tulajdonságaitól (a mi esetünkben például a megfigyelt esemény az elhaladó nők, sőt akár az elhaladó egerek magassága is lehetett volna). A törvények pontosabbak lesznek, ha események nagyon nagy csoportjaira alkalmazzák őket. Megmondják a vizsgált rendszer legvalószínűbb viselkedését, ama módozatok számát, ahogyan egy adott esemény megtörténhet, mégpedig az események összes lehetséges kimenetelének számához viszonyítva.

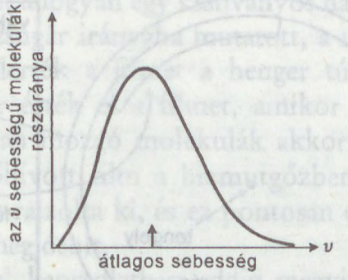


3.10 ábra. A Gauss-féle vagy „normális" valószínűségi eloszlás, a csúcsok helyzetét és a görbe szélességét meghatározó két paraméter három különböző értékére megadva. Minden egyes eloszlási görbének jellegzetes harangalakja van, és az alattuk lévő terület is ugyanakkora. Ezt a valószínűségi eloszlást közelíti meg bármely nagyszámú, egymástól független eseményből álló sorozat

E két számérték arányát az adott esemény *valószínűségének* nevezzük. Ily módon annak valószínűsége, hogy egy kockával egy dobásból hatost dobunk, egy a hathoz, ami ugyanannyi, mint annak valószínűsége, hogy két kockával hetet dobunk, mert 6 x 6 = 36 számkombináció létezik, melyek közül csak hat eredményez hetes értéket:

(6, 1), (1, 6), (5, 2), (2, 5), (4, 3) és (3, 4).

Az ilyenfajta másodrangú tudásra való hagyatkozás, amely egy eseménynek csak a valószínűségét adja meg, szegényes megoldásnak látszik Newton, Maxwell és Einstein gyönyörű képleteihez képest. Ön azt kérdi, ugyan minek vacakolunk ezzel? Sajnos, ezt a természet bonyolultsága kényszeríti ránk.

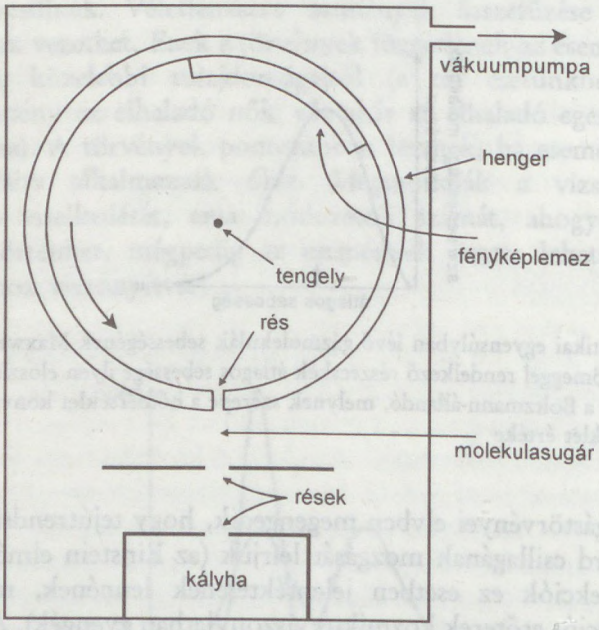


3.11 ábra. Statisztikai egyensúlyban lévő gázmolekulák sebességének Maxwell–Boltzmann-féle eloszlása. Az m tömeggel rendelkező részecskék átlagos sebessége ilyen eloszlást mutató gázban $(8kT/\pi m)$, ahol k a Boltzmann-állandó, melynek szerepe a hőmérséklet konvertálása energiává, míg T a hőmérséklet értéke

Newton mozgástörvényei elvben megengedik, hogy tejútrendszerünk mind a kb. százmilliárd csillagának mozgását leírjuk (az Einstein elmélete által megkövetelt korrekciók ez esetben jelentéktelenek lennének, mert a számba veendő gravitációs erőterek kozmikus viszonylatban gyengék). A gyakorlatban azonban ezeket az egyenleteket a tudósok képtelenek megoldani. Mind ez ideig a matematikusok még három, a gravitáció hatására egymás körül keringő test esetében sem tudták megoldani a mozgásegyenleteket. Ugyanakkor a csillagászati kutatásokban együtt mozgó csillagok milliárdjait tartalmazó rendszereket vizsgálnak.

A legnagyobb és leggyorsabb szuperszámítógépek sem tudják megoldani azokat az egyenlet-sorozatokat, amelyek az egyes csillagok pályáját irányítják, amint a milliónyi egyéb csillag gravitációs hatásától lökdösődve hol egyik, hol másik irányban haladnak. Hasonló kutyaszorítóban vagyunk akkor, amikor mozgástörvényeinket egy közönséges szobában lévő gázmolekulákra kívánjuk alkalmazni. Olyan sok van belőlük, és mindegyiknek a mozgása olyan szorosan összefügg a többi molekula mozgásával, hogy az egyedi mozgásukat szabályozó *törvények* ismerete nem sok hasznunkra van. Egyszerűen képtelenek vagyunk megoldani azokat az egyenleteket, amelyek e törvényekből következnek.

Ebben a zavaros helyzetben kompromisszumot keresünk, melyről aztán kiderül, hogy váratlanul kellemes tulajdonságai vannak. Bár a három mozgó csillag problémájának megoldása túl nehéz számunkra, a megoldás csillagok milliárdjainak esetében nem milliárdszor nehezebb.

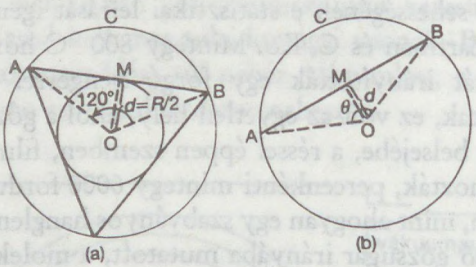


3.12 ábra. Zartman és Ko ötletes kísérleti elrendezése a hőmérsékleti egyensúlyban lévő gázmolekulák sebességeloszlásának kimutatására. Adott sebességeloszlással rendelkező molekulapopulációt hozunk létre a kályhában. Ezután sugárba gyűjtjük őket, amelyet egy forgó hengeren található résre irányítunk. A mintázat a henger túloldalán elhelyezett filmen kirajzolja a molekulák sebességének eloszlását. (A. Beiser *Concepts of Modern Physics* - McGraw-Hill, 1967. 247. lap - című művéből; a kiadó engedélyével.)

Mikor rendkívül sok testet vizsgálunk, az eseményeket statisztikus tendenciák kezdik uralni. Bár képtelenek vagyunk pontosan megjósolni minden egyes csillag viselkedését, meg tudjuk adni annak valószínűségét, hogy egy csillagot egy adott helyen, bizonyos irányban és adott sebességgel találunk mozogni. S hasonlóképpen, meghatározott hőmérsékletű gáz esetében meg tudjuk adni a molekulák behatolhattak sebességének valószínűségi eloszlását. Ez az úgy nevezett Maxwell-Boltzmann-féle eloszlás, melyet a 3.11 ábra mutat be.

A gázmolekulák sebességének e statisztikai leírását igen szellemesen ellenőrizte 1930-ban I. Zartman és C. Ko. Mintegy 800 °C hőmérsékletű bizmutgőz keskeny sugarát irányították egy forgó hengerre. A henger oldalán keskeny rést nyitottak, ez volt az egyetlen hely, ahol a gőz a henger belsejébe juthatott. A henger belsejébe, a réssel éppen szemben, filmet helyeztek, majd a hengert forgásba hozták, percenkénti mintegy 6000 fordulat sebességgel (kb. 133-szor gyorsabban, mint ahogyan egy szabványos hanglemez forog). Amikor a vékony rés a beeső gőzsugár irányába mutatott, a molekulák behatolhattak a henger belsejébe, és elérték a filmet a henger túloldalán. A gyorsabban mozgó molekulák akkor érték el a filmet, amikor az még csak egy kicsit fordult el. Míg a lassabban mozgó molekulák akkor, amikor az már sokkal jobban elfordult. Az előhívott film a bizmutgőzben lévő molekulák sebességének pontos eloszlását rajzolta ki, és ez pontosan olyan volt, mint amilyet Maxwell és Boltzmann megjósolt.

A fizikai alkalmazással kapcsolatban eddig megvitatott valószínűségekről feltételeztük, hogy egyértelműen definiáltak, mégpedig a korábban megtárgyalt esethez (adott érték dobásának valószínűsége két kockával) hasonló módon. Valamely esemény valószínűségének értéke: azon esetek száma, amikor az esemény megtörténik, osztva az összes lehetséges esetek számával. Ahhoz, hogy a valószínűség ilyetén definíciója koherens legyen, elég egyértelműnek kell lennie, hogy melyek az egyformán valószínűnek tekintett alapesemények. Ezt követően tudjuk meghatározni egy esemény valószínűségének helyes értékét, kiszámítva az események relatív gyakoriságát. A kockadobás esetében nyilvánvaló az egyformán valószínű elemi események mibenléte; vannak azonban alattomos esetek, mikor is az egyformán valószínű események azonosítása egyáltalán nem egyértelmű. Sokféle lehetőség közül választhatunk, és a tényleges választás fogja megszabni az egyes események valószínűségének számszerű értékét. Az efféle megoldhatatlan helyzeteknek klasszikus példája Joseph Bertrand problémája: határozzuk meg annak valószínűségét, hogy a kör egyik véletlenszerűen kiválasztott húrja hosszabb lesz, mint a körbe írható egyenlő oldalú háromszög oldala! A 3.13 ábrán a feladat három megoldását adjuk meg. Mindegyik más-más eredményt ad! És mindegyik helyes! Annak ellenére, hogy a feladat pontosan megfogalmazottnak látszik, bizonytalanságot tartalmaz, és megengedi, hogy különböző típusú elemi eseményekhez azonos valószínűségeket rendeljünk. Tényleges választásunk dönti el, hogy a Bertrand-probléma megoldása 1/2, 1/3 vagy 1/4 lesz-e. Így tehát a valószínűség becslését nem lehet teljesen mechanikusan végezni. A probléma „egészének" valamiféle szubjektív áttekintése szükséges ahhoz, hogy megoldásának jelentése világos legyen.



3.13 ábra. Bertrand paradoxonja. Annak valószínűségét kívánjuk kiszámítani, hogy a kör egy *véletlenszerűen* berajzolt húrja hosszabb, mint a körbe írható egyenlő oldalú háromszög oldala. A két rajz olyan szerkesztéseket szemléltet, melyeket a megoldás kiszámításának elősegítésére rajzolhatunk. Legyen a húr az AB szakasz, és jelöljük meg ennek felezőpontját, M-et, így OM merőleges AB-re. A kör sugara R, az OM szakasz hosszát jelöljük d-vel. Az első esetben azt állítjuk, hogy d értéke egyforma valószínűséggel eshet bárhová 0 és R közé. Ekkor az (a) rajzból nyilvánvalóan látjuk, hogy egy véletlenszerűen berajzolt húr a háromszög oldalánál csak akkor lesz hosszabb, ha d kisebb, mint $R/2$. Ennek valószínűsége tehát 1/2. Ez a Bertrand-paradoxon első megoldása. Következő esetként vegyük azt az elgondolást, hogy az M pont a körön belül egyforma valószínűséggel eshet bármely pontba. Azt látjuk, hogy a berajzolt húr csak az esetben lehet hosszabb a háromszög oldalánál, ha az M pont az $R/2$ sugarú kis körön belül esik. A kiszámítandó valószínűség tehát $\pi(R/2)^2$ és πR^2 aránya, vagyis 1/4. Harmadszorra úgy okoskodhatunk, hogy az AOB szög egyforma valószínűséggel vehet fel bármely értéket 0 és 360 fok között. A kívánt esemény most csak akkor fog megtörténni, ha ez a szög 120 és 240 fok között van. Ennélfogva a valószínűség $(240-120)/360 = 1/3$. A három eset mindegyikében más-más módon történt az azonos valószínűségűnek feltételezett események kiválasztása

Termodinamika

> Az a törvény, hogy az entrópia állandóan nő – a termodinamika II. főtétele –, szerintem a természet törvényei között a leghatalmasabb. Ha valaki arra figyelmeztet, hogy a világegyetemről alkotott kedvenc elméleted ellentmond Maxwell egyenleteinek, sebaj, úgy kell a Maxwell-egyenleteknek. Ha ellentmond a megfigyelt tényeknek – ugyan már, ezek a kísérleti fizikusok néha igencsak elszúrják a dolgokat. Ha azonban azt találod, hogy elméleted a termodinamika II. főtételével áll ellentétben, akkor semmi jóval nem biztathatlak; csúfos bukás vár reád.
>
> A. S. Eddington

A részecskék nagy csoportjainak – akár atomokról, akár csillagokról van szó – viselkedésében tapasztalható rendszeresség az anyag „statisztikus mechanikájához" vezet. E megközelítés szépsége abban rejlik, hogy egyszerű

statisztikai mennyiségek, mint például a részecskék átlagos sebessége, határozzák meg azokat a számunkra ismerős makroszkopikus tulajdonságokat, mint amilyen pl. a hőmérséklet. A természetben található statisztikus mechanikai rendezetlenség makroszkopikus következményei három fontos, roppant széles hatókörű statisztikai törvényt eredményeznek.

Az első törvény az energia megmaradását mondja ki:

> Zárt rendszerben az összes energia mennyisége nem változhat.

Elsőként Rudolf Clausius német fizikus fogalmazta meg ezt a tételt a XIX. század első felében, egy kísérletsorozat elvégzése után, melyben a gőzgépek mint erőforrások tulajdonságait és korlátait kívánta meghatározni. A törvény a következőt állapítja meg: bár egy zárt, tökéletesen elszigetelt rendszeren belül számos dolgot megtehetünk, amelyek az energiát egyik formájából a másikba alakítják – például amikor felhúzzuk óránkat, akkor a testünkben lévő kémiai energiát átalakítjuk izomenergiává, amely viszont az óra felhúzott rugójában tárol „potenciális", rugalmas energiát, s végül lassan mozgási energiává visszaalakulva az óra mutatóit mozgatja –, de energiát nem tudunk megsemmisíteni, csak át tudjuk alakítani más formákba. A „kinetikus" és „potenciális" energia megkülönböztetése az 1850-es évekből származik. Kelvin először „dinamikus" és „statikus" energiának, míg Rankine „aktuális vagy észlelhető" és „potenciális vagy rejtett" energiának nevezte őket. A jelenlegi terminológiában Kelvin és Tait szóhasználata rögződött. Rankine 1853-ban kifejtett egy megmaradási törvényt, amely felismeri a különböző energiaformák egymásba alakulását:

> Az energia megmaradásának törvénye már ismert, az tudniillik, hogy az aktuális [kinetikus] energia és a potenciális energia összege a világegyetemben mindig állandó marad.

Einstein későbbi felfedezése az energia és a tömeg egyenértékűségéről ($E = mc^2$) nem dönti meg Clausius energiamegmaradási elvét, csupán felfedi, hogy a tömeg nem más, mint hatalmas mennyiségű rejtett energia, és a termodinamikai törvények ellenőrzése során ezt az energiát is számításba kell venni. Ha atomoszcillációval működő karórám lenne, az tömeget alakítana át energiává – Einstein képletének megfelelően – az óramutatók mozgatására (nem ajánljuk ezt a modellt). A tömeg és energia egyenértékűsége miatt az energiamegmaradás elvét újabban gyakran a tömeg-energia megmaradás elvének nevezik.

Clausius törvényének mindenféle érdekes következménye van. Azt mondja ki, hogy energia nem keletkezhet a semmiből spontán módon, amiként azt is, hogy nem tudunk örökmozgót építeni, vagyis olyan szerkezetet, amely örökké működne külső energiaforrás igénybevétele nélkül. A gyakorlatban ezeknek a találmányoknak le kellene győzniük a különböző súrlódási erőket, energiát felhasználva. Ez az energia hővé alakul és elvész, s mert a rendszer teljes energiája nem változhat, a szerkezet mozgási energiájának kell csökkennie. Végül a súrlódási ellenállás az összes mozgási energiát hővé alakítja. A mérnökök természetesen úgy tervezik meg a csapágyakat és a kapcsolódó alkatrészeket, hogy mozgásuk a lehető legsimább legyen, és kenőanyagokat használnak a súrlódás miatti energiaveszteség csökkentésére. Ezzel azonban csak ideig-óráig késleltethető az örökmozgó leállása, amely előbb vagy utóbb elkerülhetetlenül bekövetkezik.

Clausius többet tett annak megállapításánál, hogy az összenergia különböző energiafajtákká alakítható, de nem teremthető és nem semmisíthető meg. Felfigyelt arra a jelenségre, amely a valóságos gépek működésének leírásából nyilvánvaló. Egyes erősen rendezett energiafajták, mint például a mozgási energia vagy a gyufa meggyújtásakor felszabaduló kémiai energia, előbb-utóbb kivétel nélkül hőenergiává alakulnak, ugyanakkor a fordított folyamatot ritkán észleljük. Amikor kerékpárunk fékjeit működtetjük, a mozgási energia a fékbetétekben hővé és egy kevés hangenergiává alakul. A hő maga is mozgás. A fékbetétek megemelt hőmérséklete azt jelzi, hogy a betéteket alkotó gumi molekuláinak megnövekedett a mozgási energiája. Az egyedüli lehetőség arra, hogy ezt a folyamatot megfordítsuk, és egy gép mozgását hőenergia révén hozzuk létre, az, ha a gépen belül hőmérséklet-különbség van két hely között. Ebben az esetben a hőmérséklet-különbség kiegyenlítődésének folyamata meghatározott irányú mozgást fog eredményezni. Ha egy adott rendszerben a hőmérséklet mindenhol azonos, akkor a hőenergia nem alakítható vissza mozgási energiává. S ez azt mutatja, hogy a természet bizonyos fokig egyirányú utca. Az energia hajlamos arra, hogy a makroszkopikusan rendezett formákból (mint például a kerékpár mozgási energiája) mikroszkopikusan rendezetlen formába, azaz hővé alakuljon. E rendezetlenségnek a mértékét nevezte Clausius „entrópiának", melyet a termodinamika 1865-ben közölt híres II. főtétele szabályoz:

Tetszőleges zárt rendszer teljes entrópiája sohasem csökkenhet.

Ez a törvény megmagyarázza, hogy miért nem tudjuk a leállított motorú gépkocsit lejtőn felfelé hajtani pusztán hőmérsékletének csökkentésével, amint

azt az I. főtétel, az energia megmaradásának elve, igazából megengedné, ha nem lenne megerősítve a II. főtétellel. C. P. Snow legalább olyan felháborítónak tartotta, hogy a hétköznapi emberek nem ismerik ezt a törvényt, mintha egy tudós még soha nem hallott volna Shakespeare-ről. *Két kultúra és a tudományos forradalom* című híres előadásában megjegyezte:

> Jó néhány esetben voltam olyan emberek társaságában, akik a hagyományos mérce szerint nagyon műveltnek számítottak, és különös élvezettel fejtették ki véleményüket a tudósok műveletlenségéről. Egyszer-kétszer feldühödtem, és megkérdeztem a társaságot, hogy hányan tudnák elmondani a termodinamika II. főtételének lényegét. A reakció hűvös volt, és egyúttal elutasító.

A termodinamika II. főtétele valószínűleg a tudomány legerősebb általános elve. Kivétel nélkül érvényes az összes megfigyelt fizikai jelenségre. Ha érvényes a világegyetemre mint egészre is, akkor alapvető kihatással van jövőbeli fejlődésére. A termodinamika e törvénye felelős a világegyetem „hőhalálára" vonatkozó elképzelés kialakulásáért, mely Jeans és Eddington lelkes népszerűsítő tevékenységét követően, az 1930-as években olyannyira borúlátóvá tett számos filozófust. És ezzel a törvénnyel éltek vissza oly hírhedett módon a laikusok is. Legmakacsabb példája ennek az amerikai kreacionisták érvelése, mely szerint az evolúció elmélete nem lehet igaz, mert ellentétben áll a II. törvény ama követelményével, hogy a rendezetlenségnek az idő múltával növekednie kell. Érthető, hogyan alakulhat ki ilyen nézet: az evolúciót tanulmányozó biológusok bizonyítékot szolgáltatnak arra, hogy bonyolult, magasan rendezett életformák alakultak ki egyszerűbb, kevésbé rendezett formákból parányi, nem túlságosan valószínűtlen evolúciós változások és az elkerülhetetlen természetes kiválasztódás hatására. S ez látszólag arra utal, hogy a rendezetlenség renddé fejlődik, ellentmondásban a II. főtétellel. Hol a tévedés?

A II. főtételt zárt rendszerekre fogalmazták meg, vagyis olyan rendszerekre, melyek elszigeteltek abban az értelemben, hogy a határfelületeken át nem juthat be a rendszerbe energia. A Föld felszíne, ahol az evolúció lezajlott, nem tekinthető ilyen értelemben zárt rendszernek. Hőenergiát kap a Naptól, melynek felszíni hőmérséklete a Földének hússzorosa. Ha ezt is figyelembe vesszük, akkor az evolúció során bekövetkezett teljes entrópiaváltozásnak a földi rendszerbe történő hőenergia-beáramlást is tartalmaznia kell. Amint ezt is számításba vesszük, a II. főtételt a kívánt módon érvényesnek találjuk. A fenti téves ellenvetés hasonló ahhoz, amit egy asztalosnak tehetnénk, aki finom vonalú széket készített egy halom farönkből. A II. főtétel nem akadá-

lyozza meg az asztalost abban, hogy rendezetlen fadarabokból magasan rendezett mesterművet alkosson, mert az alkotás során a kezével és szerszámaival a fának átadott energia nagy mennyiségű hőt termel. Mikor ezt a külső hőt is figyelembe vesszük az entrópiamérleg számításánál, az általa okozott entrópianövekedés mindig nagyobb, mint a fadarabok elrendezése által létrehozott lokális entrópiacsökkenés. Amikor a rendszerek kívülről energiát kapnak, bennük mindenféle különleges események következhetnek be, melyek nem a rendezett struktúrák lerombolására, hanem spontán megjelenésére vezetnek. (A láng ennek egyik példája.) Az ilyen „nyitott" rendszereket behatóan kutatják a modern tudomány számos területén.

A termodinamikának van egy III. főtétele is, amely a részecskékből álló halmazok megengedett viselkedését írja elő. A törvény ezt állítja:

> Véges számú lépésben nem lehet abszolút nulla fok hőmérsékletre lehűteni egy rendszert.

Ennek megértéséhez vissza kell emlékeznünk arra, hogy a hőmérséklet a gázmolekulák átlagos sebességének mérőszáma. Elképzelhető tehát, hogy olyan sok energiát vonunk el a molekuláktól, hogy mozdulatlanná válnak. Ezt az állapotot nevezzük „abszolút nulla" hőmérsékletnek, a Celsius skálán ez -273 foknak felel meg. A gázok és folyadékok nagyon alacsony hőmérsékleten mutatott viselkedését tanulmányozó tudósok a hőmérséklet Kelvin-féle skálájának használatát találták kényelmesnek. Ezen a skálán a hőmérsékletet Celsius fokokban adjuk meg, de az abszolút nullától mint kezdőponttól számítva; így a mai hőmérséklet, 15 °C, a Kelvin skálán 288 °K.

A termodinamika három főtételének – az energiamegmaradás elve, az összentrópia csökkenésének lehetetlensége, az abszolút nulla fok elérésének lehetetlensége – mondanivalóját egyszerűbb nyelven így foglalhatnánk össze: azt mondják ki, hogy először is „Ön nem nyerhet", másodszor „Még a pénzénél sem tud maradni", harmadszor „A játékból nem lehet kiszállni"! Még ennél is komolytalanabbul: azt mondják ki, hogy a kapitalizmus azon a téves feltételezésen alapul, hogy nyerhetünk, a szocializmus azon, hogy a pénzünknél tudunk maradni, és a tévedések e hármasságát a miszticizmus teszi teljessé, amely azon alapul, hogy ezekből a játékokból ki lehet szállni!

Fontos felismerni, hogy a termodinamika törvényei statisztikus jellegűek. Nagyszámú részecskéből álló rendszerekre érvényesek, nem egyes molekulákra. Mi azért vesszük észre működésüket, mert annyival nagyobbak vagyunk az atomoknál és molekuláknál, így nagy sokaságaik együttes viselkedését észlelni tudjuk. E törvények a részecskékből álló rendszerek átfogó statisztikai

tulajdonságait fejezik ki, mely tulajdonságok nem függenek az egyedi részecskéktől, illetve a rájuk ható erők jellegétől. Emiatt hangsúlyozta Eddington fentebb idézett megjegyzésében, hogy a termodinamika törvényeit a tudósok elsődlegesnek vélik. Ám ez nem tekinthető tudatos elhatározásnak, melynek értelmében a termodinamika törvényeit bármennyi ellentmondó bizonyítékkal szemben fenn kívánnánk tartani. Inkább annak jelzése, hogy – mivel a termodinamika törvényei nem a világot alkotó elemi részecskék jellegének és tulajdonságainak részletein alapulnak – e törvényeket az elemi részecskékről alkotott elképzeléseink változásai nem rázkódtatják meg.

Rendetlen íróasztalok

> Ha egy tetszőleges pillanatban a világegyetem összes részecskéjének mozgását pontosan az ellenkezőjére változtatnánk, akkor attól kezdve a világ fejlődése egyszerűen megfordulna. A vízesés alján szétpukkanó buborék újra összeállna, és beleolvadna a víztükörbe, a hőmozgások energiája újra összpontosulna, és a víztömeg cseppjeit felfelé dobná, s egy felfelé haladó vízoszlopban egyesülnének ... az élő szervezetek visszafelé fejlődnének: ismernék a jövőt, de fogalmuk sem lenne a múltról, és végül meg nem születettekké válnának.
>
> Lord Kelvin

A statisztikus törvények bevezetését a nagyszámú részecskéből (csillagokból, gázmolekulákból stb.) álló rendszerek viselkedésének leírására nem szabad úgy értelmeznünk, mintha e részecskék mozgásában bármiféle valódi bizonytalanság vagy véletlenszerűség volna. Ha elég okosak lennénk ahhoz, hogy megoldjuk Newton mozgásegyenleteit a szobában lévő trilliónyi, egymással kölcsönhatásban lévő levegőmolekulára nézve, akkor minden egyes részecske pontos pályáját megállapíthatnánk – ezt azonban nem tudjuk megtenni. Ehelyett kihasználjuk azt a tényt, hogy nagyszámú részecske együttesen megjósolható véletlenszerűséget fog mutatni, és azt találjuk, hogy e rendszerek legvalószínűbb viselkedését megnyugtatóan egyszerű törvények szabályozzák. A rendszerek viselkedését a részecskék mozgásának statisztikai leírásából származó átlagértékekkel jellemezzük, melyeknek makroszkopikus fizikai értelmük van, mint például a nyomás és a hőmérséklet.

A termodinamika II. főtételének statisztikai oldala első látásra némileg rejtélyes, mert a nagyszámú részecskéből álló rendszerek meghatározott tulajdonságának időbeli változásáról állít valamit: azt, hogy egyre rendezetlenebbé válnak. Felhasználhatnánk ezt a jövő (az idő folyásának iránya)

meghatározására, ha olyan időgépünk volna, melynek irányításával nem vagyunk tisztában. Ha viszont elég okosak lennénk, megoldhatnánk Newton egyenleteit, hogy megkapjuk a részecskék időbeli mozgásának pontos leírását. Ugyanakkor Newton egyenleteinek és mozgástörvényeinek van egy egyszerű tulajdonsága: nem teszik lehetővé a jövő és a múlt megkülönböztetését. Ha levetítenének önnek egy filmet, amely biliárdgolyók Newton törvényei szerint történő ütközéseinek egy sorozatát mutatná, akkor a mozgások megfigyelése útján nem tudná eldönteni, hogy a filmet az eredetileg felvett irányban vagy visszafelé játszották-e le. Azt mondjuk, hogy ezek a mozgástörvények invariánsak az idő megfordításával szemben. Mind Maxwell, mind pedig Einstein egyenletei rendelkeznek ezzel a tulajdonsággal. Itt rejlik tehát az ellentmondás: ha a részecskék Newton törvényei szerint történő mozgását mutató film mindkét irányban ugyanolyannak látszik, akkor a mozgás hogyan eredményezhet olyan statisztikai mennyiséget, mint az entrópia, amely kivétel nélkül mindig növekszik az idő folyásának egyik irányában? Vajon Newton törvényei összeférhetetlenek-e a II. főtétellel? Vagy talán a statisztikai átlagolás, melyet a II. főtétel levezetésekor alkalmaztunk, valamilyen információ elvesztését okozta? Ebből a látszólagos paradoxonból egy egyszerű tanulságot vonhatunk le.

Mindennapi tapasztalataink példákat szolgáltatnak a II. főtétel működésére. Ugye, íróasztalunk és gyermekeink szobája pillanatok alatt a rend állapotából rendetlenséggé fajul, de sohasem fordítva? Newton mozgástörvényeinek időbeli megfordíthatósága azt sugallja, hogy gyönyörű borospoharak üvegdarabokból történő össszeállását ugyanolyan gyakran kellene észlelnünk, mint a poharak leesését és darabokra törését. De nem így történik.

Az általunk észlelt mozgásokat nem egyedül Newton törvényei szabályozzák. A kiindulási állapottól is függnek, és bizonyos kiindulási állapotok a többinél sokkalta valószínűbbek. Így például a gondatlanság – mint kiindulási állapot –, amely miatt egy poharat nagyobb entrópiájú, rendezetlen üvegdarabok halmazára összetörni látunk, összehasonlíthatatlanul valószínűbb, mint az a kiagyalt helyzet, melyben megfelelő alakú üvegdarabok pontosan megfelelő sebességgel mozgásba jöve pohárrá állnak össze. Egy ilyen esemény olyan elképzelhetetlenül valószínűtlen, hogy megtörténtét az emberiség egész történetében egyszer sem észlelték. A természeti törvényekben nincsen semmi olyasmi, ami ezt megtiltatná, de kivételesen sajátos helyzetnek kellene fennállnia ahhoz, hogy a törvények működése ezt az eseményt valóban létrehozza. Ebben az értelemben láthatjuk, hogyan is tartalmazza egy statisztikus elem az entrópia növekedésének „törvényét".

Rendetlen íróasztalunk hétköznapi esetében a rosszból a még rosszabba tartó egyirányú tendenciát meg tudjuk érteni a különböző eseménysorozatok

egymáshoz viszonyított valószínűségére való hivatkozással. Sokkal, de sokkal több módon válhat íróasztalom rendezettből rendezetlenné, mint ahogyan rendezetlenből rendezetté. A II. főtétel ebben az értelemben statisztikus: azt a tényt fejezi ki, hogy A állapotból B-be sokkal többféle úton juthatunk el, mint B-ből A-ba, amennyiben A rendezettebb, mint B. A levitáció nem sérti meg a természet törvényeit – az ön testének molekulái, véletlenszerű ütközéseik folytán, akár egyszerre mind felfelé is mozoghatnának ebben a pillanatban –, csak ez éppen elképzelhetetlenül valószínűtlen. Igazából sokkal, de sokkal valószínűtlenebb, mint az, hogy tévedünk, ha a levitációt leíró beszámolókat tévesnek tartjuk.

Démonok munkában

A Sátán is tudja Shakespeare-t idézni a saját érdekében.

G.B. Shaw

Egy különös, a statisztikus természettörvényekkel kapcsolatos problémát még Maxwell ismert fel 1867-ben. A kérdés megoldása majdnem ötven évet vett igénybe. Maxwell azt vetette fel, hogy e törvényeket befolyásolhatják-e hozzánk hasonló, (feltételezetten) értelmes lények cselekedetei:

> Ha elképzelünk egy lényt, kinek képességei annyira kifinomultak, hogy minden egyes molekula pályáját követni tudja, akkor e lény, bár képességei ugyanúgy alapvetően korlátozottak, mint a mieink, meg tudna tenni olyan dolgokat is, melyek számunkra jelenleg lehetetlenek. Azt láttuk ugyanis, hogy a molekulák egy levegővel teli tartályban olyan sebességekkel mozognak, melyek semmiképpen sem egyformák, jóllehet bármely véletlenszerűen kiválasztott sokaságuk átlagos sebessége azonos. Tegyük fel, hogy a tartályt két részre osztjuk (A és B) egy fallal, melyen kis ajtó van. Ha lényünk képes az egyedi molekulákat megfigyelni, akkor arra is képes, hogy az ajtót úgy nyissa és zárja, hogy csak a lassú molekulákat engedje át B-ből A-ba. Ily módon munkavégzés nélkül növeli a B oldal hőmérsékletét és csökkenti az A oldalét, a termodinamika II. főtételével ellenkezően.

Azok a természeti törvények, amelyekkel eddig találkoztunk, objektív jellegűek, a megfigyelőtől függetlenek. Karteziánus szellemben mindig el tudtuk különíteni a megfigyelőt a külső világtól. A tudósok tökéletes búvóhellyel rendelkező természetbarátok, akik a világot annak megzavarása nélkül figyelik. Első látásra a speciális relativitáselmélet mintha bevezetné a „meg-

figyelőt" a fizikába, de ez nem így van. Igaz, a speciális relativitáselmélet azt állítja, hogy különböző relatív mozgásban lévő megfigyelők nem tudnának megegyezni a tömeg, idő és hosszúság általuk mért értékeiben, de mind egyetértenének a tömegek, hosszúságok és időtartamok összefüggéseit leíró törvényeket illetően, és adott tömegeket, hosszúságokat és időtartamokat, melyek hozzájuk képest nyugalomban vannak, mind egyformának találnának. A megfigyelt eseményeket irányító törvényeket a megfigyelők minősége vagy mozgása Einstein elméletében ugyanúgy nem befolyásolja, mint Newtonéban. Az pedig teljesen lényegtelen, hogy a „megfigyelők" Geiger–Müller-számlálók, fényképlemezek vagy emberek.

Úgy látszik, hogy a statisztikus törvényszerűségek felfedezése a megfigyelő és a megfigyelt jelenség e különállóságát megingatja, és lehetővé teszi, hogy a „megfigyelő", szellemi képességei révén, mintegy ötödik hadoszlopként becsempéssze magát a mikrovilág működésébe. Ha ugyanis a II. főtétel nem más, mint annak kifejezése, hogy sokkal többféle módon juthatunk el A-ból B-be, mint fordítva, akkor mi volna, ha egy értelmes lény az eseményeket kitüntetett módon az A-ból B-be vezető keskeny ösvényre terelné, s így az események nagyobb valószínűséggel követnék ezt, mint a B-ből A-ba vezető széles utat? Clerk Maxwell meglepő példán mutatta be, hogy szerinte miképpen történhetne a természet ilyetén befolyásolása. S ezzel előtérbe helyezte azt a viktoriánus problémát, hogy milyen módon lehet az élet és az emberi intelligencia létének tényét a determinisztikus természeti törvények színterébe illeszteni, bár ez nem volt célja a példa megalkotásakor. Maxwell meg volt győződve arról, hogy a II. főtétel antropomorfizmus, mely annak tudható be, hogy sokkal nagyobbak vagyunk a gáz molekuláinál. Ha érzékszerveink eléggé élesek volnának ahhoz, hogy egyedi molekulák viselkedését megfigyeljük, akkor elő tudnánk idézni a hő hidegebb testekről melegebbekre való áramlását a molekulák egyenkénti befolyásolásával. Maxwell ezt kihangsúlyozandó gondolta ki példáját. Vizsgáljuk meg alkotórészeit!

Vegyünk egy zárt dobozt, amely egyensúlyban lévő, állandó hőmérsékletű gázt tartalmaz. A rendszer entrópiája ekkor maximális. A molekulák sebességének eloszlása már fel kellett hogy vegye a Maxwell és Boltzmann által megjósolt, Zartman és Ko által kísérletileg igazolt formát. Az egyensúlyi állapot beállása megakadályoz minket abban, hogy a gáz energiáját bármiféle gép működtetésére felhasználjuk. Ehhez az volna szükséges, hogy a dobozon belül hőmérséklet-különbség álljon fenn. Ha ilyen különbséget létre tudnánk hozni, akkor a molekulák mozgását, amely a II. főtétel szerint történne a hőmérsékleti egyensúly helyreállítására, fel tudnánk használni egy gép hajtására, mely a dobozhoz megfelelőképpen kapcsolódna.

Maxwell homokot szórt a gépezetbe azzal a felvetésével, hogy elképzelhető egy mikroszkopikus lény (Kelvin „válogató démonnak" keresztelte el), aki dobozunkban a molekulákkal trükköket csinál. Tegyük fel, hogy állandó hőmérsékletű gázt tartalmazó dobozunkba egy falat illesztünk, mely így a dobozt két részre osztja (A és B), de a falba vágunk egy kis csapóajtót. A csapóajtó működtetését ördögi kollégánkra bízzuk, akit a molekulák sebességének meghatározására alkalmas éles szeme és a csapóajtó kezelésében mutatott ügyessége alapján szemeltünk ki. Főnöke szigorúan utasítja arra, hogy a csapóajtót csak akkor nyissa ki, ha az A rekeszből az átlagosnál gyorsabb vagy a B rekeszből az átlagosnál lassúbb molekulát lát közeledni, egyébként pedig tartsa zárva. Idő múltával démonunk már feltehetőleg a legtöbb gyors molekulát B-be, a lassúakat pedig A-ba terelte, mégpedig anélkül, hogy bármelyik molekulára erőhatást gyakorolt volna. Mivel mindkét rekesz hőmérséklete a benne lévő molekulák átlagos sebességétől függ, a doboz két felének hőmérséklete energia befektetése nélkül eltérővé vált. Ezt a hőmérséklet-különbséget gépünk működtetésére mindaddig felhasználhatjuk, amíg csak nem fogy el a molekulákat osztályozó démon türelme. Örökmozgót készítettünk a termodinamika II. főtételének ellenére!

Maxwell démona az eszét használja a doboz rekeszeiben lévő molekulák statisztikai eloszlásának befolyásolására. E ténykedésével nem sérti meg az energiamegmaradás törvényét. Ha az ilyenfajta csodás mesterkedés lehetséges, még ha csak elvileg is, akkor ezzel kifogásolható szubjektivitás jelenik meg a termodinamika törvényeiben. Habár a törvény egyedi megsértései mikroszkopikus szinten történnek, ezek – ha megengedjük lehetőségüket – összegeződnek, és a II. főtétel nagymértékű megsértését eredményezik. Mások, mint például Tait, akinek Maxwell a démon-paradoxont először kifejtette, meg voltak győződve arról, hogy a II. főtételt a természeti folyamatok valóban megsértik. Tait érvelése szerint a csillagok által kibocsátott energia jelentékeny részének ki kell szivárognia világegyetemünkből egy másik világba, ahol eltérő termodinamikai törvények uralkodnak (valójában a fény számottevő részét egyszerűen eltakarta vagy elnyelte a csillagközi por).

Bár Maxwell és kortársai nem hittek abban, hogy egy „démon" valóban képes volna ilyen helytelen dolgokat cselekedni, nem tudták megindokolni, hogy miért nem. Sokan közülük beérték azzal a kijelentéssel, hogy úgysem léteznek ilyen mikroszkopikus démonok! Ez persze nem oldja meg a problémát. A termodinamika logikai ellentmondás-mentességének megőrzéséhez ki kell mutatnunk, hogy semmiféle mikroszkopikus démon nem létezhet, aki meg tudná tenni azt, amit a Maxwell-démon megtehet. Kiderült, hogy ez lehetséges, bár Maxwell idejében ehhez még nem tudtak eleget.

A démon vállalkozásának gyenge láncszemét Szilárd Leó fedezte fel 1929-ben, amelyet aztán mások idővel egyre tüzetesebben tanulmányoztak. A gondot az okozza, hogy a csapóajtóhoz közeledő molekulákról a démonnak meg kell állapítania, hogy melyik a gyors és melyik a lassú, csapdába kell ejtenie őket, átengedni a megfelelő rekeszbe, majd visszaállítani készülékét abba az állapotba, amely ismét alkalmassá teszi a következő molekula átlagnál gyorsabb vagy lassúbb sebességének meghatározására. S hogy ezt megtehesse, valamilyen módon kölcsönhatásba kell lépnie a molekulákkal, mondjuk úgy, hogy megvilágítja őket, és meghatározza, hogyan változott meg a visszavert fény hullámhossza*. Az a munka, amelyet el kell végeznie, hogy megkülönböztesse a gyors és lassú molekulákat, és az a munka, amellyel *utána ezt az információt megsemmisíti a művelet kiindulási állapotból való megismétlésének érdekében*, mindig meghaladja azt a munkát, amelyet a démon ténykedésének eredményeként létrehozott hőmérséklet-különbség kihasználásával végezhetünk. A Maxwell-démont kiűztük. Ugyanúgy nem képes a II. főtételt megsérteni, mint ahogy a ruletten sem nyerhetünk, ha mindig az összes számot megjátsszuk. Egy ilyen stratégia megvalósítása mindig többe kerül, mint az elérhető nyereség.

Az örök visszatérés

> Ahhoz, hogy láthassuk, miként áramlik a hőenergia a hidegebb testről a melegebbre, nincs szükségünk a Maxwell-démon éles szemére, intelligenciájára és ügyességére. Elég az, ha van némi türelmünk.
>
> Henri Poincaré

A francia matematikai-fizikust, Henri Poincarét nem hagyta nyugodni az a kérdés, hogy voltaképpen mi is a helyzet a termodinamika II. főtételével. A „reverzibilitási paradoxont" – vagyis azt, hogy az entrópia idő múltával való növekedésének az egyedi molekulákra vonatkozó newtoni mozgástörvényekből kell következnie, melyeknek nincsen kitüntetett időbeli iránya – meg lehetne kerülni, ha a II. főtétel csupán az emberi dimenziókban történő statisztikai átlagolás volna, de mikroszkopikusan megsérthető lenne. Poincaré 1893-ban némileg tovább mélyítette az időszimmetrikus mozgástörvények és a termodinamikai törvények konfliktusát. Kimutatta, hogy nem kell mikrosz-

*A radaros sebességmérésben is alkalmazott Doppler-effektusról van szó. – *A ford.*

kopikus méretűnek lennünk ahhoz, hogy a II. főtétel megsértését megfigyelhessük, csak elég sokáig kell várnunk. A mechanikai mozgások valamely véges energiával rendelkező és véges térfogatú rendszere végtelen sokszor tetszőleges pontossággal meg fogja közelíteni akármelyik korábbi állapotot. Még ha egy magasan rendezett, alacsony entrópiájú rendszerből indulunk is ki, és ez eleinte rendezetlenebbé válik a II. főtételnek megfelelően, egy jövőbeli időpontban tetszőlegesen közel kell kerülnie az eredeti, rendezett állapothoz. Ehhez azonban az entrópiának csökkennie kellene. A világegyetem egyhangú, egyirányú viselkedése, melyet a II. főtétel irányoz elő, nem vezethető le a newtoni törvények ciklikus jellegű következményeiből.

A problémára különböző válaszok születtek. Egy rendszer Poincaré-féle visszatérési ideje hihetetlenül magas érték – $10^{10^{80}}$ év – a világegyetemben található legidősebb objektumok 4–18 milliárd éves korához képest. Az, hogy a II. főtétel megsértésére ilyen hosszú ideig kell várakoznunk, egy másik mód annak kifejezésére, hogy ez mennyire valószínűtlen. Boltzmann és mások számára, akik a II. főtétel statisztikus értelmezését fenntartották, ez teljesen elfogadható volt. Nem tagadták, hogy elvileg minden rendszerben előfordulhatnak olyan ütközések, melyek számos üvegdarabot arra késztetnek, hogy pohárrá álljanak össze a II. főtétellel ellentmondásban. Ezt csupáncsak hihetetlenül valószínűtlennek tartották.

Két lehetőség van. Egyrészt azt is gondolhatnánk, hogy a világmindenséget magasan rendezett, alacsony entrópiájú állapotban teremtették, amely azután a rendezetten maradás lehetőségeinél oly sokkal többféle módon válhatott rendezetlenné, hogy a rendezetlenség felé való fejlődésének igen nagy a valószínűsége. Amint a távoli jövőben egyre közelebb jut az egyensúlyhoz, az egyes állapotok megismétlődésének valószínűsége meg fog növekedni. Másrészt elképzelhetjük úgy is, hogy a világmindenségben mint egészben állandó hőegyensúly áll fenn, helyről helyre és időben változó statisztikus ingadozásokkal. E nézet szerint volnának olyan helyek, ahol az entrópia növekszik, és olyanok, ahol csökken, ahogyan azt a newtoni törvények időbeli szimmetriája alapján várhatjuk. De ha emberi élet csak ott lehetséges, ahol az entrópia nő, akkor ez megmagyarázná, hogy miért létezünk egy entrópianövekedést mutató környezetben. Ezt a feltevést mind Boltzmann, mind pedig Poincaré támogatta, és különböző érvrendszerek születtek annak bizonyítására, hogy az entrópiacsökkenést mutató környezetben előforduló különös instabilitások az élet létezését lehetetlenné tennék. Így például valamely élő szervezet két része közötti kis hőmérséklet-különbség instabil módon állandóan növekedne, ahelyett, hogy kiegyenlítődne, mint a mi világunkban.

Poincaré egészen 1904-ig fenntartotta azt a meggyőződését, hogy a II. főtétel nem a mikrovilághoz képest durva megfigyeléseink statisztikus követ-

kezménye. Akkor győződött meg végleg arról, hogy a II. főtétel mikroszkopikus méretekben történő megsértése megtörténhet, amikor a Brown-mozgás megfigyelésekor észlelték ezt a jelenséget.

Kvantumtörvények: természet az Édentől keletre

> Egy időben az újságok azt írták, hogy a világon csak tizenkét ember érti a relativitás elméletét. Nem hiszem, hogy valaha is lett volna ilyen időszak. Elképzelhető egy olyan időpont, amikor csak egyetlen ember értette, mert ő volt az, aki kitalálta, de még nem írta le. Amint azonban az emberek elolvasták közleményét, ilyen vagy olyan módon sokan megértették, bizonyosan többen, mint tizenketten. Másrészt viszont azt hiszem, nyugodtan elmondhatom: a kvantummechanikát senki sem érti.
>
> Richard Feynman

A termodinamika törvényeinek statisztikus jellege abból fakad, hogy nagyszámú részecske egyidejű, összevissza mozgását nem lehet leírni. Az olyan elvek bevezetése, mint „valószínűség", „legvalószínűbb viselkedés", „véletlenszerűség", nem feltételez semmiféle belső határozatlanságot a molekulák vagy csillaghalmazok ütközéseiben. Csupán azt tükrözi, hogy képtelenek vagyunk pontosan meghatározni őket.

Az ilyenfajta statisztikus törvények léte nem jelent kihívást a fizikai törvények egyszerű, realista felfogását vallók számára. Bár az olyannyira hasznos fogalmak, mint amilyen a hőmérséklet és az entrópia csak átlagként léteznek, avagy olyan matematikai műveletek formájában, melyek az adott rendszer lehetséges állapotait számlálják meg, mindazonáltal ezeket a fogalmakat olyan tulajdonságok (mint pl. a molekulák sebessége) alapján alkották meg, melyek létezésében nincsen okunk kételkedni.

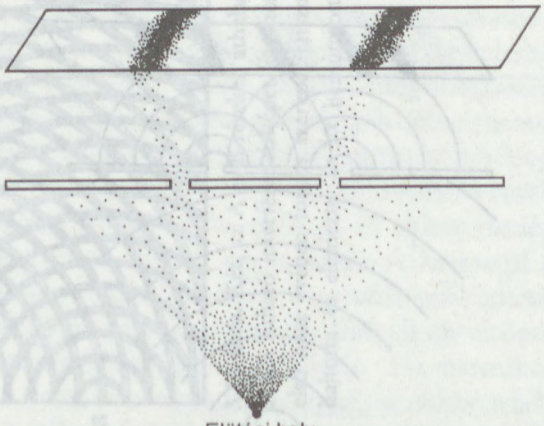
A XX. század első negyedében a fizikai valóságról alkotott nézeteink különleges megrázkódtatáson estek át, melynek következménye máig is mélyreható és eldöntetlen viták tárgya a fizikusok körében. A felvetett problémák és a természeti törvények alapvető tulajdonságaiként javasolt elképzelések oly módon támadták meg a valóságról alkotott eszméinket, melyet egyetlen filozófus sem láthatott előre. Figyelemre méltó, hogy ezek a viták egy olyan fizikai elmélet körül zajlanak, melynek kísérleti előrejelzései pontosabbak, és technológiai felhasználása szélesebb körű, mint bármely más tudományos eredményé. Majdnem teljes egészében ennek az elméletnek az anyag mikroszkopikus szinten való viselkedésére vonatkozó előrejelzésein alapul rendkívül pontos mai technológiánk. Ugyanakkor ez az elmélet gyöke-

resen megváltoztatja a megfigyelő helyzetét, belső határozatlanságot mutat ki a természetben, és a valóságról valami igazán különlegeset fed fel, ami kísérletileg ellenőrizhető. Mindez része a kvantumokról szóló, máig tartó különös történetnek.

Szkizofrén anyag

> A költő csak a fejét szeretné a mennybe emelni. A logikus az, aki a mennyeket szeretné a fejébe tömni. És az ő feje reped meg.
>
> G. K. Chesterton

Már Newton óta tudjuk, hogy a fénysugarak különösfajta „szkizofréniára" hajlanak. Bizonyos körülmények között piciny részecskeként viselkednek, más esetekben úgy tesznek, mintha hullámok lennének. De beláthatjuk, hogy vannak olyan esetek, amikor valódi logikai ellentmondás léphet fel. Addig nincs semmi baj, amíg azt mondjuk, hogy egy adott tömeg úgy viselkedik, mint egy meghatározott hullámhosszú rezgés, vagy megfordítva. Ha azonban ezt a részecske/hullám dolgot bezárjuk egy dobozba, és a dobozt két részre osztjuk, akkor a részecskeértelmezés szerint az a doboz egyik vagy másik felében lesz. De melyik felében lesz a hullám?

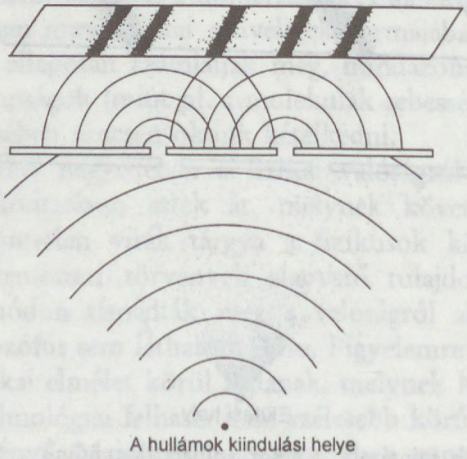


3.14 ábra. Becsapódások mintázata, amikor golflabdákat ütünk a cél felé egy olyan falon keresztül, melyen két rés van. A célpont két, a rések mögött elhelyezkedő sávja tele van szórva találatokkal

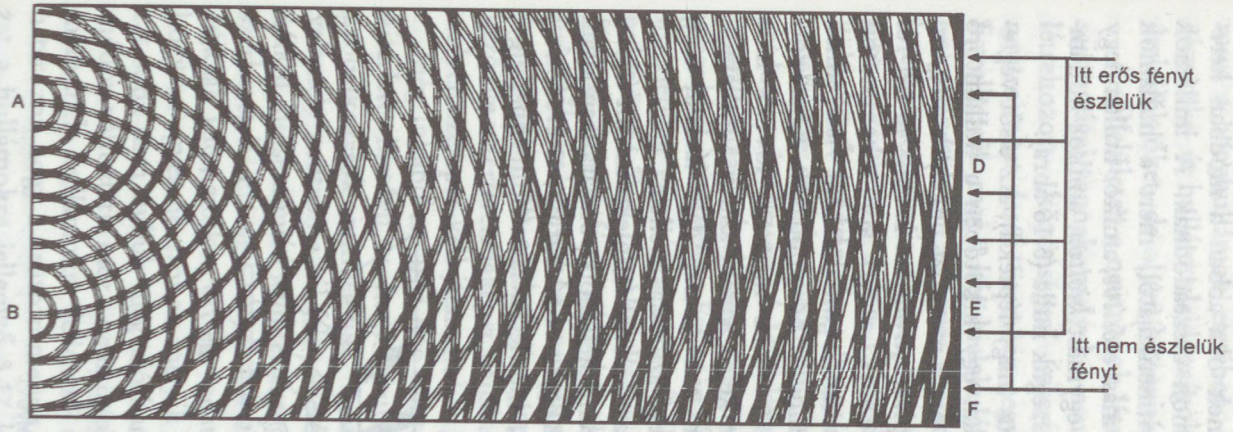
Az anyag mikroszkopikus részecskéinek e váratlan tulajdonságát legjobban három helyzet vizsgálatával szemléltethetjük, melyeket először Richard Feynman (aki a legtöbbet tette az anyag és a fény jelenkori kvantumelméletének megalkotásáért) állított ily módon szembe egymással. E helyzetek a részecskék és hullámok alapvető, belső különbségeit mutatják meg.

Először üssünk golflabdákat egy célfelület felé két keskeny résen keresztül, melyeket a cél és az elütési hely között elhelyezett falon vágtunk. A rések elég szélesek ahhoz, hogy átengedjék a golflabdákat (lásd 3.14 ábra). Az eredmény teljesen nyilvánvaló. A célfelületen két sávban lesznek találatok, ott, ahol a labdák egyik vagy másik résen áthaladtak. A találatok mindkét sávban szóródnak valamelyest, mutatva, hogy a rések valamivel szélesebbek, mint a labdák átmérője. A két sáv közti eltakart felületen nem lesznek találatok.

Hajtsuk most végre ezt a kísérletet nagy intenzitású *hanghullámokkal*, melyeket egy hangszóróból irányítunk a rések felé (3.15 ábra). Az eredmény teljesen különböző lesz. Ha megfigyeljük a hang érkezését a célfelülethez, mégpedig úgy, hogy mérjük a hang intenzitását a felület különböző helyein, váltakozva alacsony és magas hangintenzitású sávokat fogunk találni. Ha letakarjuk az egyik rést, és meghatározzuk az intenzitás új értékeit a célfelületnél, és összeadjuk ezeket az értékeket azokkal, amelyeket a másik rés letakarása esetén mérünk, azt találjuk, hogy az összeg *nem* azonos azzal, amit akkor mértünk, amikor mindkét rés nyitva volt. Amikor mindkét rés egyidejűleg nyitva van, fellép a hullámok interferenciájának jelensége.



3.15 ábra. Intenzitásmintázat, amikor hullámokat bocsátunk a célfelületre egy falon keresztül, melyen két rés van. A célfelületen váltakozva alacsony és magas intenzitású helyeket találunk

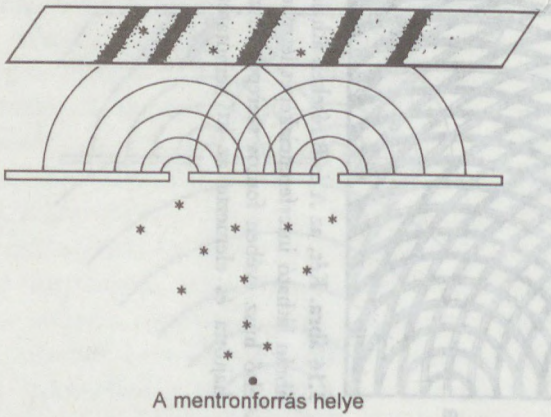


3.16 ábra. Két, az A és B réseken áthaladó hullám egymást erősítő és kioltó interferenciájának jelensége, amely a 3.15 ábrán látható interferenciaképet létrehozza. Az ábrán Thomas Young eredeti rajza látható. Young a XIX. század első húsz évében fontos szerepet játszott a fény hullámjellegének megállapításában, és ő volt az első, aki végrehajtotta és elemezte az itt bemutatott kettős-rés fényinterferencia-kísérletet

Az ún. *interferenciamintázat* keletkezésének oka abban a módban keresendő, ahogyan a két résből érkező hullámok összeadódnak. A hullámok „aritmetikája" különbözik a részecskék aritmetikájától, mert a hullámok kölcsönhatásba léphetnek egymással akár egymást *erősítve*, amikor hullámhegy hullámheggyel találkozva összeadódik, akár egymást *kioltva*, amikor hullámhegyek hullámvölgyekkel találkoznak, és összegük nulla (3.16 ábra).

Mindkét fent leírt kísérlet makroszkopikus (nagy léptékű). Az elsőt végrehajthattuk volna ágyúgolyókkal, a másodikat egy kikötőben a hullámtörő gátnak ütköző vízhullámokkal. Tegyük fel, hogy most azt figyeljük meg, mi történik akkor, ha szubatomi részecskéket, pl. neutronokat lövünk ki két rés felé. Ha a célfelületre fényképlemezt helyezünk, a 3.17 ábrán bemutatott rendkívül meglepő eredményt kapjuk. A neutronok golflabdaként viselkednek abban az értelemben, hogy a lemezen minden becsapódásuk határozott nyomot hagy. Amint azonban mind több és több neutront lövünk ki a résekre, az egyes becsapódási nyomok olyan képet adnak, amely a hullámok interferenciájára jellemző. Egyes sávokban sok becsapódást látunk, míg másokban keveset, bizonyos statisztikai jellegű szóródás mellett.

Bár a neutronok a golflabdákhoz hasonlóan különálló objektumként érkeznek a célhoz, annak valószínűségét, hogy a célfelület adott pontjára csapódnak be, egy hullám intenzitása szabja meg. Ha az egyik rést lezárjuk, az eredmény egy egyszerű hullámintenzitás-eloszlás lesz, interferencia nélkül, éppen úgy,



3.17 ábra. A részecskék észlelésének mintázata, amikor neutronokat irányítunk a célfelület felé egy falon keresztül, melyen két rés van. A célfelületen látható észlelési mintázat olyan, mint amilyet a hullámok hoznak létre a 3.15 ábrán, annak ellenére, hogy ez a mintázat ugyanúgy elkülönülő észlelésekből áll össze, mint a 3.14 ábra szerinti elrendezésnél

mint a hanghullámok esetében. Ily módon a neutronok egyaránt mutatnak részecske- és hullámtulajdonságokat: a célnál különálló „találatok" formájában észleljük őket, de olyan intenzitáseloszlással, amely a hullámokra jellemző.

A célfelületen a neutronok létrehozta interferenciaképnek további különös sajátosságai vannak, melyek a neutronok interferenciáját a hanghullámok által létrehozott „közönséges" interferenciánál szövevényesebbé teszik. Ha a neutronokat lassú ütemben, egyenként lőjük a célra, hogy folyamatában figyelhessük meg a kép kialakulását, s így megakadályozhassuk a nyilvánvaló kölcsönhatásokat az egyes neutronok között, akkor is azt találjuk, hogy az interferenciamintázat becsapódásról becsapódásra lassan kialakul. Még különösebb a következő dolog. E kísérletet elvégezhetnénk azonos módon a világ különböző helyein úgy, hogy előre meghatározott időpontban minden célfelületre egyetlen neutront lövünk ki. Ha e teljesen független kísérletek eredményeit összegeznénk, akkor azt találnánk, hogy a végeredmény a hullám interferenciaképével lenne azonos! Egyedi neutronok képesnek látszanak saját magukkal interferálni. Ez aztán tényleg az „egy kéz tapsol" esete. A különálló kísérleteket egymástól nagy távolságban is elvégezhetnénk, időben úgy hangolva össze őket, hogy az alatt az idő alatt, amíg a neutron eléri a célt, semmiféle jel, még a fény sebességével haladva se juthasson el az egyik kísérlet helyéről a másikra, hogy valamilyen módon összehangolja az egyes kísérletek eredményeit. Az eredmény ugyanaz: az egyedi neutronbecsapódások összegeződve interferenciaképet adnak. Honnan tudják az egyedi neutronok, hogy milyen szerepet kell játszaniuk a „helyes" interferenciakép kialakításában?

Még inkább zavarba ejtő tény a mikroszkopikus kettős rés interferenciakísérletet illetően az, hogy a hullám–részecske bizonytalanság feloldására tett próbálkozások mindegyike, amely annak megállapítására irányul, hogy valamely neutron a cél felé vezető útján melyik résen ment keresztül, kivétel nélkül megsemmisíti az interferenciaképet. A neutronok meglehetősen kényes szerkezetek. Ha úgy helyezünk el egy-egy fotocellát a réseknél, hogy akkor adjanak jelet, amikor ott egy neutron halad át, akkor esetleg kideríthetnénk, hogy az egyes neutronok melyik résen haladnak keresztül a cél felé. Sajnos, ezt soha nem tudjuk megvalósítani. A fotocellát működtető fény hatása oly módon változtatja meg a neutronok viselkedését, hogy eltünteti a kísérlet eredményének hullámokra jellemző sajátosságait. Ha bármikor is meg tudjuk határozni, hogy a neutron melyik résen halad át, akkor a célnál észlelt mintázat a hullámokra jellemző 3.17 képből a részecskékre jellemző 3.14 képpé alakul át. Bármely esetben, amikor elhatározzuk, hogy megvizsgáljuk, vajon a neutron részecskeként viselkedik-e, s hogy melyik résen halad át, akkor – és csak akkor – azt találjuk, hogy részecskeként viselkedik. Ha nem próbáljuk

meg kideríteni, hogy részecskeként viselkedik-e, akkor – és csak akkor – hullámként fog mutatkozni. Nem lehetséges semmiféle szerkezetet készíteni, amely az interferenciakép megsemmisítése nélkül képes volna meghatározni, hogy a neutron melyik résen haladt át.

Ez meglehetősen különbözik mindattól, amit a klasszikus fizikában találunk. Teljesen új kihívással szembesíti összes filozófiai feltevésünket, melyek a természet törvényeire és a mögöttük lévő valóságra vonatkoznak. Úgy látszik, hogy a természet megfigyelője alapvető szerepet játszik annak meghatározásában, hogy mi figyelhető meg, de oly módon, amely számos apró részletben különbözik attól a régi idealista elgondolástól, hogy mindent a néző szeme teremt meg. A naiv realista ragaszkodna ahhoz az elképzeléshez, hogy létezik objektív világ, akár tetszik ez nekünk, akár nem, és ez a világ meghatározott tulajdonságokkal rendelkezik, melyek függetlenek bármiféle vizsgálattól. Sajnos, ez az elképzelés a kvantumtörvényekkel való első találkozáskor összeomlik. Az észlelt esemény a megfigyelés aktusával együtt *közösen* határozza meg, hogy mit figyelhetünk meg a kettős rés interferenciakísérletben. Ez nem jelenti azt, hogy arra a következtetésre kell jutnunk, hogy minden megfigyelt dolgot maga a megfigyelés hoz létre, olyan értelemben, ahogyan egy idealista vagy szolipszista állítaná. Nincs szükség arra, hogy a valóság létezésébe vetett hitünket feladjuk. Csupán arról van szó, valamely dolog megfigyelésére alkalmazott módszereink meghatározzák, hogy mit fogunk találni. A valóság kontextuális. Fel kell ismernünk azt is, hogy az a valóság, amely a fotonok és neutronok mikrovilágának történéseit irányítja, legalábbis nagyon különbözik attól a képtől, melyet róla oly nagyméretű tárgyak megfigyelése alapján alkottunk, melyeknek kvantumhullámhossza elenyészően kicsiny, és hullám jellegű viselkedésük gyakorlatilag megfigyelhetetlen. Ez nem jelenti azt, hogy a golflabdáknak nincsenek hullámszerű tulajdonságaik. Vannak. A golflabdák azonban olyan nagyok a neutronokhoz képest, és hullámhosszuk olyan kicsiny, hogy hullám jellegű viselkedésük az emberi szem számára láthatatlan.

Belső bizonytalanság

> A fizikusok kénytelenek voltak az elérhető legjobb megoldást választani, és szomorú arccal járkálva arra panaszkodtak, hogy hétfőn, szerdán és pénteken hullámként kell kezelniük a fényt, kedden, csütörtökön és szombaton pedig részecskeként. Vasárnap pedig csak imádkoztak.
>
> Banesh Hoffmann

A részecskék hullámjellegét először egy francia herceg, Louis-Victor de Broglie jósolta meg 1924-ben. A jóslatot három évvel később Davisson és Germer kísérletei igazolták, akik valóban végrehajtották a kettős rés neutron-interferencia-kísérletet, melyet fentebb leírtunk, és kimutatták a neutronok által létrehozott hullám interferencia-kép keletkezését. De Broglie levezetett egy egyszerű, de alapvető formulát, amely megadja egy m tömegű részecske hullámjellegének L hullámhosszát:

$$L = h/mv, \tag{3.9}$$

ahol v a részecske sebessége, h pedig egyetemes állandó, amely a fizikusok előtt a fény kisugárzásának vizsgálata révén a Planck-féle állandóként ($h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J.s) már ismert volt. De Broglie merész feltevése az volt, hogy ez a formula kivétel nélkül minden testre érvényes. Durván fogalmazva, a részecskék kvantumos hullámjellegének akkor kell erőteljessé válnia, amikor de Broglie-féle hullámhosszuk, L, nagyságukkal összemérhető vagy annál nagyobb, míg ha fizikai méretük sokszorosan meghaladja de Broglie-féle hullámhosszukat, akkor hullámjellegük elhanyagolható lesz. Mivel a h annyira kis szám, azt találjuk, hogy a mindennapi tárgyak sokkal nagyobbak, mint de Broglie-féle hullámhosszuk, a neutronok és a mikrovilág egyéb, nagyon kis tömeggel rendelkező részecskéi azonban kisebb méretűek, mint de Broglie-féle hullámhosszuk, ezért viselkedésükben a kvantumos hullámjelleg a meghatározó. Ezért van az, hogy a golflabdák nem hoznak létre észrevehető hullámszerű mintázatot a célfelületen. Habár a valóságban a golflabdáknak is van de Broglie-féle hullámhossza, az elképzelhetetlenül kicsi a labdák és így a rések méretéhez képest.

A hullámjelleg egyetemessége azt sugallja, hogy összefüggés van a világ megfigyelésének eredménye és a megfigyelés jellege között. Amikor megfigyelünk valamit, akkor fényt érzékelünk, amely a megfigyelt tárgyról verődött vissza. Ha a tárgy helyzetét nagy pontossággal akarjuk mérni, akkor olyan rövid hullámhosszú fényre van szükségünk, melynek egyetlen rezgése sem téveszti el a tárgyat. Ám minél rövidebb a hullámhossz, annál nagyobb a rezgésszám, illetve annál nagyobb a fény energiája, s ezért annál jobban megzavarja a mérendő tárgy viselkedését.

A mérés pontosságának eme korlátozása egyfajta tükröződése annak a belső, a dolgok lényegéből eredő korlátozásnak, melyet először Werner Heisenberg foglalt össze 1927-ben. Ha megkíséreljük megmérni egy részecske x helyzetét és p impulzusát (az impulzus a részecske tömegének és sebességének szorzata), akkor mindig lesz egy maradandó bizonytalanság x és p bármely egyidejűleg

elvégzett mérésében, a részecske viselkedésébe a méréssel történt beavatkozásunk miatt. Jelölje a helyzet és impulzus mérésében jelentkező eme bizonytalanságokat Δx és Δp. Ekkor a Heisenberg-féle határozatlansági elv kifejezhető az alábbi egyenlőtlenséggel:

$$\Delta x \Delta p \geq h/4\pi \qquad (3.10)$$

Ismét megjelenik a nagyon kis értékű Planck-állandó, ami azt jelenti, hogy a mérésben jelentkező bizonytalanság sokkal kisebb annál, mint amit emberi szem felfedezhetne. Nem fogunk közlekedési balesetben meghalni pusztán azért, mert nem tudtuk a közeledő gépkocsi sebességét és helyzetét kellő pontossággal megítélni.

A határozatlansági elv azt állítja, hogy *elvileg* lehetetlen egyidejűleg nagyobb pontossággal, mint $h/4\pi$ megmérni egy részecske helyzetét és impulzusát. Az elvet a laikusok sokszor csupán annak kimondásaként értelmezik, hogy a mérés elkerülhetetlenül befolyásolja a megfigyelt dolog állapotát – hasonlóképpen a fényképész problémájához, aki „természetes" felvételt szeretne csinálni, vagy a madármegfigyelőéhez, aki rejtve szeretne maradni búvóhelyén. Ez az elkerülhetetlen beavatkozás azt eredményezi, hogy lehetetlen *pontosan* megtudni, hogy mi volt a mérendő objektum állapota a mérés előtt. Legyen például egy atom mozdulatlan a térben, és így impulzusa nulla. Helyzetének meghatározására irányuló próbálkozásunk szükségszerűen (bár közbeeső lépéseken keresztül) alkalmazni fog fénysugarakat, melyek az atomról visszaverődve retinánkra jutnak. A fénysugarak atomba ütközése azonban meg fogja változtatni annak helyzetét, és így bizonytalanságot fog előidézni a helyzetben, s e bizonytalanság minden esetben eleget tesz a Heisenberg-féle egyenlőtlenségnek.

A fenti magyarázat látszólag kielégítő volta ellenére fontos felismernünk, hogy a Heisenberg-féle határozatlansági elv azért mélyebb ennél. A tudásunkban emiatt az elv miatt jelentkező elkerülhetetlen bizonytalanság semmiképpen sem mérőeszközeink *tökéletlenségének* tükröződése – eszközeink pontossága ma már megközelíti a (3.10) Heisenberg-egyenlőtlenség által megadott korlátot. Még ha óráink, mérlegeink és mikroszkópjaink *tökéletesen* pontosak volnának, akkor is azt találnánk, hogy a helyzet és impulzus egyidejű mérése korlátozott a belső bizonytalanság miatt. A határozatlansági elv megszabja, hogy milyen mértékben lehet a világot, a dualista elképzelés szerint, megfigyelőre és megfigyeltre felosztani.

A határozatlansági elv fenti, népszerű értelmezése, mely szerint a bizonytalanságot az egyébként pontosan meghatározott jelenség megzavarása okozza,

nem ismeri fel a világ kvantumos felfogásának valódi értelmét. Nem veszi figyelembe a megfigyelő által létesített valóság problémáját, amely a kettős rés interferenciakísérlet értelmezését megnehezítette. Nem hivatkozik közvetlenül megfigyelőkre (egy mikroszkóp éppen úgy lehetne a megfigyelő), és azt sejteti, hogy a helyzet és az impulzus pontos értékei valójában egyidejűleg léteznek, de eredendő ügyetlenségünk miatt soha nem vagyunk képesek megváltoztatásuk nélkül megmérni őket.

A kvantumelmélet, melyet századunk harmincas éveiben fejlesztettek ki, és azóta is sikeresen használnak, ennél sokkal mélyrehatóbb nézeteket tanít: annak oka, hogy képtelenek vagyunk a helyzetet és az impulzust egyidejűleg tetszőleges pontossággal mérni, az, hogy a részecske helyzetének és impulzusának fogalma nem létezik egyidejűleg. A klasszikus fizikában tapasztaltak arra a téves felfogásra vezettek bennünket, hogy a mikrovilág jelenségeit le tudjuk írni olyan fogalmak segítségével, mint a helyzet és impulzus, melyeket a nagyméretű tárgyak mozgásának megfigyelése útján alakítottunk ki. A kvantumtörvények uralta mikrovilágban kiderül, hogy amikor elhatározzuk az egyik mennyiség pontos megmérését, akkor a mért állapot többé már nem rendelkezik a másik tulajdonsággal. Nem szabad azt képzelnünk, hogy csupán képtelenek vagyunk megfigyelni. A két tulajdonság nem létezhet együtt. A kettős rés interferenciakísérletben ez nyilvánul meg, ha avégből próbáljuk meg egyidejűleg meghatározni a neutron helyzetét és impulzusát, hogy megtudjuk, melyik résen ment át. Amikor ezt tesszük, a célfelületnél észlelt és rögzített valóság egy részét megsemmisítjük, és a hullámmintázat, melyet az egyedi részecskék célhoz vezető útvonalaira szerettünk volna felbontani, átalakul a részecskékre jellemző mintázattá.

Niels Bohr – a kvantumelmélet egyik megalkotója, akivel Heisenberg együtt dolgozott, amikor felfedezte a határozatlansági elvet – az ilyen, egyidejűleg tetszőleges pontossággal nem mérhető mennyiségeket (pl. helyzet és impulzus) *komplementer pároknak* nevezte el. A természetben léteznek más komplementer párok is, például az idő és az energia. A kettősrés-kísérletben a komplementaritás megnyilvánulását láttuk, amikor megpróbáltuk megállapítani, melyik résen ment keresztül egy neutron az interferenciaképhez vezető útja során. Ennek sikertelensége a neutron hullám- és részecskejellegének komplementaritását tükrözi. Vagy részecskejelleget, vagy hullámjelleget valósíthatunk meg, de nem mindkettőt. Az egyikfajta viselkedés megfigyelése biztosítja a másik nemlétét.

Hangsúlyoznunk kell tehát, hogy a kvantumfelfogás sokkal radikálisabb, mint a logikai pozitivisták gyakorlatias nézete, akik azt tartották, hogy értelmetlen olyan mennyiségekről beszélni, melyeket nem tudunk mérni. A

komplementaritás elve azt állítja, hogy nem csak értelmetlen a helyzet és impulzus egyidejű pontos ismeretéről beszélni: ezek a mennyiségek nem léteznek (egyidejűleg). A helyzet világos.

Bohr azonban – akinek saját címere még a keleti eredetű *jin* és *jang* szimbólumpárt is magában foglalta – úgy tartotta, hogy a komplementaritás elvének filozófiai jelentősége sokkal szélesebb körű, s nem csupán a kvantumfizika pontos matematikai következményeként való megjelenése. Azt sugallta, hogy az emberi tapasztalat paradox jelenségei hasonló, de inkább pontatlanabb „bizonytalansági elvek" hatálya alá esnek. Azt mondta például, hogy a szabad akarat és determinizmus egymást kizáró fogalmai, vagy a vitalisztikus és mechanisztikus világnézetek esetleg komplementer párokat alkothatnak, így ha valaki elfogadja az egyiket, akkor a másik értelmetlenné válik. Ezt a szélesebb körű komplementaritást, az atomi rendszerek leírásának sikertelenségéhez hasonlóan, úgy értelmezte, mint egyszerű, klasszikus elveink elégtelenségét arra, hogy a természet valódi jellegét megragadják, nem pedig mint bármilyen objektív valóság együtt-létezésének tagadását. A komplementaritás e kvantumfizikán kívüli alkalmazásai első pillantásra a szabatos kvantumelvek meglehetősen derűlátó extrapolációjának tűnnek föl, de valószínűbb, hogy éppen ezek a nézetek ösztökélték Bohrt arra, hogy a fizikán belül a komplementaritást hangsúlyozza. Bohr édesapja fiziológus volt, aki éppen a komplementaritás elvét vezette be saját kutatási területére, hogy a biológiai jelenségek leírásában a teleologikus és mechanisztikus elképzelések ellentéteit összebékítse. Úgy érvelt, hogy bármelyik nézet érvényessége attól függ, hogy mi az a kérdés, amelyet a természetnek felteszünk. Láthatjuk, hogyan vezet a komplementer leírások jelenléte „bizonytalansági összefüggésekhez" a biológiai és társadalomtudományokban is. Egy élő állat fiziológiai jelenségeinek vizsgálatához az állatot meg kellene ölnünk, fel kellene boncolnunk. A megfigyelő beavatkozása a vizsgált példány természetét visszavonhatatlanul megváltoztatja. A megfigyelőtől való ilyenfajta függés a helyszíni antropológiai megfigyelések esetén is alapvető problémaként jelentkezik. Az utóbbi években egyesek azt állították, hogy a csendes-óceáni szigetvilág kultúrájának a néhai Margaret Mead által végzett klasszikus vizsgálatát lényegesen eltorzította a megfigyelt emberek pajkos viselkedése, melyet az ő jelenléte váltott ki.

Úgy látszik, hogy a kvantumfizika arénáján kívül a filozófusok nem sokat törődtek Bohr elképzeléseivel. Ismerünk heurisztikus példákat, mint például egy festmény ecsettechnikájának és hatásának mint egésznek egyidejű megítélése: az egyikhez szükséges perspektíva éppen a másik lehetőségét zárja ki. Bár érdekes rámutatni, hogy ehhez hasonló tulajdonságok léteznek a kvantumfizikán kívül is, ez mégsem vezetett a szóban forgó problémákat illetően

semmilyen új ismeret megszerzésére. A humán tudományokban a komplementaritás pusztán régi problémák új jelöléseként jelenik meg, nem pedig valamelyik probléma megoldásaként. A kvantumelméletben azonban ez egy szabatos elmélet alapvető melléktermékе, melynek meghatározott következményei vannak a megfigyelésre nézve.

Niels Bohr édesapja a biológusok később „teleomechanisztikusnak" nevezett iskolájához tartozott. Kant követői voltak azokkal a biológusokkal folytatott vitáikban, akik az élet minden jelenségére mechanikai magyarázatot kerestek. Kant kiemelte az élő szervezetek céltudatos tevékenységét mint viselkedésük teljes leírásának lényeges alkotóelemét. S hasonlóképpen, egy számítógép teljes leírásának hivatkoznia kell a benne futó programok céljára és természetére, éppúgy, mint alkatrészeinek pusztán mechanikai működésére. A két dolog komplementer abban az értelemben, hogy a számítógép hardver szinten való teljes megértése nem teszi semmissé további, minőségileg más értesülések szükségességét a teljes leíráshoz. Az emberi lények a hardver szintjén tagadhatatlanul vegyületekből állnak, de helytelen volna egyedül ebből a tényből arra következtetni, hogy „csak" vegyületekből állnak. Bár a teleomechanisztikusok számos jelentős felfedezést tettek az embriológia területén, lassan elvesztették vezető szerepüket, mert tévesen azt gondolták, hogy az élő szervezetekben kis méretekben tapasztalható céltudatos aktivitás valamiféle belső „életerő" létezésének a bizonyítéka. Ezt a nézetet, amely vitalizmus néven vált ismertté, a modern biológusok elvetik. És mégis ez volt a mechanizmus és cél konfliktusának az a területe, mely Christian Bohrt arra indította, hogy a komplementer magyarázatok jelentőségét hangsúlyozza, és elültesse a forradalmiság magvait fia elméjében. Milyen különös és egyenes az út Kanttól a kvantumelméletig.

A véletlen hullámai

Pszijével Erwin
Számolt, éppen eleget,
Arra mégsem jött rá,
Pszije voltaképp mi lehet.

Felix Bloch

A kvantumprobléma különböző, eddig ismertetett szálait Erwin Schrödinger kötötte össze egy – manapság Schrödinger-egyenletnek nevezett – formula kidolgozásával, amely egy „hullámfüggvénynek" nevezett mennyiség viselkedését írja le. Ez az egyenlet a newtoni mozgásegyenleteket helyettesíti, amelyek

a tetszőleges erők hatása alatt álló részecskék sebességét és helyzetét szabják meg. A Schrödinger-féle leírásból következő „kvantummechanika" mélyreható újdonságokat vezetett be. Bár a Schrödinger-egyenlet ugyanolyan determinisztikus, mint a Newton-egyenletek – ha a hullámfüggvény értéke egy adott pillanatban ismert, akkor értékét elvileg bármely jövőbeli időpontra pontosan ki tudjuk számítani –, ez a determinizmus semmit sem jelent, mert a hullámfüggvényt nem figyelhetjük meg közvetlenül. Amikor egy fizikai rendszerben mérünk valamit, akkor a kvantummechanika alkalmazásával a mérés kimenetelére vonatkozóan csak bizonyos eredmények előfordulásának valószínűségét tudjuk megjósolni. Emberi szempontból nézve a determinizmus elve csődöt mondott. Ám semmi köze sincs az abszolút pontossággal való mérés képességét illető fogyatékosságainkhoz. Csupán a dolgok belső lényegéből fakadó bizonytalanságot tükrözi, amelyet a megfigyelő beavatkozása okoz: azt a legalacsonyabb szintet, ahol a természetben minden összefügg egymással. Nem azt tükrözi, hogy a jelenségek leírásának célszerű, átlagoló módját választottuk, mint a termodinamika esetében. Kiderül, hogy a kvantummechanika egyértelmű, determinisztikus törvényei a világ olyan rétegét írják le, melyhez nem tudunk közvetlenül hozzáférni. Megfigyelhetetlen. Ami *pedig* megfigyelhető, az csak valószínűségi alapon jósolható meg. Amint a megfigyelt objektumok nagyobbá válnak, de Broglie-féle hullámhosszuk kisebb lesz, közelebb fog esni átlagos értékükhöz, s így a klasszikus newtoni mechanika mind nagyobb pontossággal írja le viselkedésüket, vagyis a kvantumjelenségek *átlagos* értékei engedelmeskednek Newton törvényeinek.

A valamely hullámfüggvénnyel leírt kvantumrendszer mérésekor kapható lehetséges eredmények valószínűségi eloszlását úgy határozzuk meg, hogy kiszámítjuk a hullámfüggvény amplitúdójának négyzetét. A hullámfüggvény ilyenfajta értelmezését Max Born fejtette ki 1926-ban, és ez különbözik attól, amit maga Schrödinger gondolt a hullámfüggvényről. Ha újra megtekintjük a 3.17 ábrát, a kvantumleírás olyan hullámfüggvényt szolgáltat, mely függvény amplitúdójának négyzete megadja a célfelület különböző pontjaiban a neutronok becsapódásának valószínűségét (vagy sűrűségét).

Érdemes egy kicsit elgondolkozni a neutron hullámjellegéről, ahogyan az a Schrödinger-egyenlet hullámfüggvényében megjelenik. Egy részecske kvantumhulláma nem olyan, mint a hang- vagy vízhullámok. Valószínűségi hullám ez, az információ hulláma. Megmondja annak valószínűségét, hogy adott helyen mérve észleljük-e azt a hatást, amelyet a „neutronnak" nevezett valamivel társítunk. Inkább hisztériahullámként kell felfognunk, nem pedig vízhullámként. Ha a hisztériahullám egy adott helyet elér, akkor megnő annak a valószínűsége, hogy ott hisztérikus viselkedést tapasztalunk. S hasonlóképpen

a neutron észlelésének nagyobb a valószínűsége azon a helyen, ahol a hullámfüggvény valószínűsége a legnagyobb. Az atomokban például az elektronok valószínűségének csúcsértéke arra a helyre esik, amelyet az elektron pályasugarának neveznénk, ha elfogadnánk azt a gyermeteg nézetet, mely szerint az atomok hasonlítanak egy parányi naprendszerhez, melyben a keringő elektronok pontosan meghatározott pályákon körülveszik az atommagot.

A kvantumtörvényeknek van még egy feltűnő tulajdonságuk, amely megkülönbözteti őket klasszikus megfelelőiktől. A newtoni világban azonos okok azonos hatásokat hoznak létre. Sajnos, ez nem így van a kvantumvilágban. Hasonló okok a mérés eredményének hasonló valószínűségi eloszlását fogják eredményezni, de két teljesen egyforma mérés nem fog ugyanarra az eredményre vezetni. Amint korábban megjegyeztük, ha sok azonos kettősrés-kísérletet végeznénk el, és mindegyikben csak egy neutront lőnénk ki a célra, akkor a kísérletek eredményei nem lennének egyformák. Ám ha összegeznénk őket, akkor olyan valószínűségi eloszlást adnának, melynek jellegzetes hullám-interferencia mintázata lenne. Ezt jósolja a Schrödinger-egyenlet. Csodálatos egyezés van e jóslatok és a kísérletek észlelt eredményei között.

Érdemes itt néhány további gondolatot kifejteni a determinizmus csődjéről. Hozzászoktunk ahhoz a fajta klasszikus determinizmushoz, amelyet Laplace és Leibniz fejtett ki először, és amely szerint a jövőt egyértelműen meghatározza a jelen. Szinte lehetetlen ettől eltérő determinizmust elképzelni. Végül is, mi más lehetne még a jelenen kívül, ami a jövőt befolyásolhatná? Mi „determinálja" a kvantumjövőt?

A természeti törvények kutatásában megjelenő új, nem determinisztikus elem azonban kétélű dolognak bizonyul. Miközben úgy látszik, hogy a mikroszkopikus világban mindenütt bizonytalanságot vezet be, kulcsfontosságú eleme a természet nagy léptékben mutatott előreláthatóságának és stabilitásának. Az anyag kvantumelméletének egyik következménye – és elnevezésének egyik oka (*quantum* latinul mennyiséget jelent) – az, hogy feltárja: egy fizikai rendszer energiája nem lehet *tetszőleges* értékű. Ehelyett csak meghatározott, diszkrét értékeket vehet fel. Az atomok energiaszintjeit létraként képzelhetjük el, nem pedig lejtőként. Ez a következmény radikális eltérés a klasszikus newtoni szemlélethez képest, amely szerint egy rendszer energiaszintje tetszőleges lehet. A megengedett energiaszintek közti ugrások elenyészően kicsinyek, és a Planck-féle állandó *(h)* határozza meg őket. Ilyképpen nagyméretű, mindennapi tárgyak esetében az ugrások nem észlelhetők. Amikor azonban a világot atomi méretekben vizsgáljuk meg, akkor az ugrások mértéke nem sokkal különbözik az egész atom teljes energiájától. Ilyen körülmények között fontos következményei vannak annak a ténynek, hogy

az atom energiája csak pontosan meghatározott polcokon lehet. Vegyünk például egy hidrogénatomot: ez egy protonból áll, mely körül valahol elhelyezkedik egy elektron, és az elektront legnagyobb valószínűséggel egy adott pályán találjuk. Mivel ellentétes töltések ugyanúgy vonzzák egymást, mint az ellentétes mágneses pólusok, miért van az, hogy a pozitív töltésű proton és az azonos töltésű, de negatív elektron nem ütköznek össze, és nem semmisülnek meg sugárzás kibocsátása közben? Miért léteznek az atomok? A határozatlansági elv választ ad erre a kérdésre. Amint az elektron mind közelebb kerül a protonhoz, helyzetének komplementer tulajdonsága – az impulzus – mind nagyobb és nagyobb lesz, és az elektron olyan gyorsan fog mozogni, hogy a két részecskét nem lehet ilyen közel együtt tartani.

Az energiaszintek kvantálása felelős a természet egységességéért is. Ha az elektronok pályáját a központi atommag körül a klasszikus newtoni mechanika írná le, akkor az elektron *bármilyen* pályán mozoghatna, ha sebességét megfelelően választanánk meg. Ez azt jelentené, hogy minden esetben, amikor egy elektron egy proton körüli pályára volna zárva, gyakorlatilag más és más sebessége és pályasugara lenne. A következmény: minden esetben más-más konfigurációt kapnánk, és így minden hidrogénatom különböző lenne. A kvantummechanikában azonban az a tény, hogy a teljes energia csak meghatározott, diszkrét értékeket vehet fel, biztosítja, hogy amikor egy elektront egy proton körüli pályára helyezünk, erre nincsen végtelen számú lehetőség. Létezik egy minimális pályasugár, melyet az elektron elfoglalhat, s melynél az elektron hullámfüggvényének valószínűsége maximális. Ha már egyszer az elektron ebben az alapállapotban van, a fénysugárzás állandó lökdöső hatása nem tudja az elektron energiáját fokozatosan megváltoztatni. Az csak akkor fog változni, ha olyan mértékű zavarás következik be, amely elég nagy ahhoz, hogy az energiát egy teljes kvantummal megváltoztassa. Ennek eredményeként az atomok stabilak az állandóan fellépő kismértékű zavarásokkal szemben, és nem változtatják folyamatosan belső tulajdonságaikat. Az energia kvantálása az az ok, amely miatt minden hidrogénatom egyforma. Ha az energia nem volna kvantálva, minden atom más és más volna, a természet egységessége pedig megvalósítatlanul maradt eszmény volna csupán.

A kvantumvalóság természete

> A naiv realizmus a fizikához vezet, és a fizika, ha igaz, megmutatja, hogy a naiv realizmus hamis. Ennél fogva a naiv realizmus, ha igaz, akkor hamis; tehát hamis.
>
> Bertrand Russell

Mi sem tetszhet egyszerűbbnek annál, mint az a látvány, ahogyan egy neutron elhagyja forrását, majd a fényképlemezen történt becsapódása révén észlelik. Ilyen a világ kvantumelmélet előtti elképzelése. Miután a természet kvantumos jellegét megismertük, a neutron kalandjai rendkívül zavarba ejtővé válnak. Azt kényszerülünk ugyanis elhinni, hogy amit hullámfüggvénynek nevezünk, egy neutronvalószínűségi hullám térbeli tovaterjedését adja meg a Schrödinger-egyenlet által pontosan meghatározott módon. A „neutronszerűségnek" ez a hulláma elsődlegesen egy kis tartományban összpontosul, azt a benyomást keltve, hogy a neutron az általunk tömegnek nevezett dolog helyi sűrűsödése. A valóságban azonban a neutron hullám, bár az elsődleges lokális sűrűsödéstől távoli helyeken nagyon kis intenzitása van, mindenhova kiterjed, ami azt mutatja, hogy nullától különböző a valószínűsége annak, hogy a neutront *bármely meghatározott helyen* észleljük. Amikor mérést hajtunk végre a rendszeren – például egy fényképlemezt helyezünk el, amelybe a neutron becsapódik –, akkor a hullámfüggvénynek pillanatszerűen meg kell változnia ahhoz, hogy továbbra is megmondja nekünk a neutron adott helyen találásának valószínűségét. Azért, mert a neutron most már meghatározott helyen *van*, ott, ahol a becsapódás nyomát látjuk a lemezen. A mérési folyamat tehát valamilyen módon elkülönültnek látszik a kvantumtörvények által leírt egyéb folyamatoktól. A kvantumelmélet értelmezése és megértése iránti folyamatos törekvésünk alapjában afölötti vita, hogy a kvantumelmélet vajon a természetben lévő összes jelenség leírása-e, beleértve a mérési folyamatot is, vagy sem.

Az „EPR-paradoxon"

Paradoxon: olyan állítás, amely látszólag ellentmondásos vagy ellentmond a józan észnek, de talán mégis igaz.

Webster szótár

Einstein bámulatosan korán felívelő tudományos karrierje során, amikor is következetesen a lehető legmélyebb és legmesszebbre ható elképzeléseket alkotta meg a természet törvényeinek szerkezetéről, végig fenntartotta eltökélt ellenkezését a kvantumfizika elképzeléseivel szemben. Habár a fotoelektromos hatás általa felfedezett magyarázata nyitotta meg az utat amaz elképzelés előtt, hogy az energia diszkrét kvantumcsomagokban terjed, sohasem tudta elfogadni a bizonytalanságot, mely a kvantumtörvényeknek szükségszerű eleme volt. Gyakran idézett állítása, mely szerint nem hiheti, hogy Isten kockajátékot ját-

szik a világgal, tükrözi a természeti törvények hagyományos, realista megközelítésének feladásával szembeni ellenszenvét. Abban hitt, hogy a tudomány feladata a független, objektív fizikai valóság pontos leírása. Bohr komplementaritási doktrínáját ezen alapvető elv elvetésének tekintette, csupán a tudomány túlzottan pozitivista megközelítésének, mely szerint csak azoknak a dolgoknak lehet fizikai jelentése, amelyeket meg tudunk mérni. A kvantumelmélet értelmezésével és a természetre vonatkozó előrejelzéseinek valószínűségi jellegével szembeni ellenérzése kitetszik egyik barátjához, James Franckhez írott magánleveléből is:

> A legrosszabb esetben még el tudom képzelni, hogy Isten esetleg olyan világot teremtett, melyben nincsenek törvények. Magyarán: káoszt. De azt az elképzelést, hogy egyértelmű következményekkel járó statisztikus törvényeknek kell létezniük, például olyanoknak, melyek Istent arra kényszerítenék, hogy minden egyedi esetben kockát vessen, nagyon ellenszenvesnek találom.

Einstein sokszor próbálkozott Bohr kvantumelméletének megingatásával szellemes gondolatkísérletek elgondolása útján, melyeket úgy szerkesztett meg, hogy az elmélet belső ellentmondásait kimutassák. Általános vélemény szerint ezek a próbálkozások sikertelenek voltak, de mindegyikük mély és maradandó hatást gyakorolt a kvantumelmélet értelmezésére irányuló törekvésekre. Bohr fizikai valóságra vonatkozó elképzelései 1935-ben állták ki a legnagyobb erőpróbát, amikor Einstein egy munkatársaival, Boris Podolskyval és Nathan Rosennel közösen írott „forgatókönyvet" jelentetett meg. Ez nevük kezdőbetűi után EPR-paradoxonként vált ismertté, és az alábbi címmel jelent meg: *Teljesnek tekinthető-e a fizikai valóság kvantummechanikai leírása?* Célja az volt, hogy megtámadja a kvantumvalóság Bohr-féle értelmezését, mely szerint egy jelenséget mindaddig nem tekinthetünk létezőnek, amíg meg nem figyeltük, mely szerint helytelen azt gondolni, hogy a fizikusok annak felfedezésével törődnek, hogy mi *a* valóság, szemben azzal, hogy mit mondhatunk róla. Einstein, ezzel ellentétben, előnyben részesítette azt a hagyományos elképzelést, mely szerint a dolgok tulajdonságai attól függetlenül léteznek, hogy megfigyeltük-e őket vagy sem. Azért, hogy a tradicionális elképzelést pontossá tegyék, az EPR-paradoxon szerzői akkor mondták egy fizikai mennyiségről, hogy eleme a fizikai valóságnak, ha „ a rendszer megzavarása nélkül biztosan (vagyis egységnyi valószínűséggel) meg tudjuk határozni... értékét..." (Ford. Nagy Imre). Einstein és munkatársai hittek abban, hogy Bohr álláspontja alátásható, és a valóság kvantumleírásáról kimutatható, hogy nem teljes, ha be lehet bizonyítani, hogy a nem megfigyelt mennyiségeknek határozott értékei kell legyenek, mégpedig függetlenül attól, hogy megmérjük-e őket vagy sem.

Az EPR-gondolatkísérlet lényege az, hogy megfigyeljük egy instabil elemi részecske (például egy elektromosan semleges részecske) elbomlását két fotonra. Amikor a bomlás bekövetkezik, a két foton ellentétes irányba repül, és azonos impulzussal fog rendelkezni az impulzusmegmaradás törvénye miatt. A fotonoknak *perdületük* (spinjük) is lesz, és ha az egyik balra forog, akkor a másiknak jobbra kell forognia, azért, hogy az eredeti rendszer teljes perdülete a bomlás során megmaradjon. A két perdület komplementer voltát figyelembe véve az EPR szerzői képesek voltak kimunkálni egy paradoxonnak tekintett elképzelést, amely kimutatja, hogy a kvantumelmélet nem lehet teljes leírása annak, ami történik.

Amikor a részecske elbomlik, nem tudjuk előre megmondani, hogy melyik fotonnak lesz balra irányuló perdülete. A balra és jobbra irányuló perdületnek azonos a valószínűsége. De még ha a világegyetem két ellentétes végéig hagyjuk is repülni a fotonokat, amint az egyik perdületét meghatározzuk, azonnal kétséget kizáróan megtudjuk, hogy a másik foton perdülete a megmértével azonos nagyságú, de ellentétes irányú. S ezt tudni fogjuk, bár *nem* mértük meg. Az EPR-paradoxon így azt állítja, hogy a fizikai valóság általuk adott definíciója szerint a másik foton meg nem mért perdületét *valóságosnak* kell tekintenünk, mert *előre látható*. S így, következésképpen, kapcsolatban kell állnia a megfigyelőtől független valóság néhány elemével.

Annak, hogy egy ilyen felállás a paradoxon nevet kapta, az az oka, hogy a második fotonnak úgy látszik, „tudnia" kell, mi lesz az eredménye az első fotonperdület megmérésének (amiként azt is, hogy a mérést végrehajtották), azért, hogy ellentétes értéket vehessen fel, amikor szintén megmérik. Még abban az esetben is, ha a második mérést olyan kis idővel az első után végzik, hogy fényjeleknek nincs idejük eljutni az egyik mérés helyéről a másikra. Nem lehetséges tehát, hogy a második fotont „befolyásolja az első": a két foton *nem kommunikálhat* egymással.

A természet új oldala, melyet ez a kísérlet feltár, az, hogy a megfigyelés elkerülhetetlen hatása lehet *nem lokális* jellegű, vagyis a megfigyelés hatással van távoli eseményekre, melyek abban az értelemben távoliak, hogy a fényjelek és így bármiféle információcsere hatókörén kívül esnek. Az első foton perdületének megmérése azonnal megteremti a másik perdületének értékét. Ez a józan ésszel teljesen ellentétesnek látszik. Emlékezzünk csak arra, hogy az egyik ok, amiért Newton eredeti gravitációs törvénye nem volt kielégítő, az volt, hogy az elmélet megkövetelte azonnali hatások fellépését egy adott helyen, tőle távol történt események eredményeként. Hozzá kell tennünk, hogy Alain Aspect francia fizikus és munkatársai 1982-ben egy sorozat valódi EPR-kísérletben kimutattak egy ilyen nem helyi jellegű hatást. Lényegében azt

tették, hogy az eredeti spin-állapotot tízbilliomod másodpercenként megváltoztatták, és eközben mérték a bomlási termékek azonos nagyságú, de ellentétes perdületét akkor, amikor ezek már négyszer olyan messze voltak egymástól, mint az a távolság, melyet a fény az eredeti perdület megváltozása óta megtehetett volna. A kvantumelmélet előrejelzései igaznak bizonyultak.

Az egyik lehetőség a komplementaritás megkerülésére az, hogy létezik a mennyiségeknek egy másik csoportja, melyek a mérési folyamattól függetlenül mindig pontosan meghatározottak, és e „rejtett paraméterek" játsszák a természeti törvényekben a főszerepet. Azokban a kísérletekben, amelyekben úgy találjuk, hogy a helyzet és impulzus meghatározását a Heisenberg-féle határozatlansági elv korlátozza, létezhetnek más, ismeretlen mennyiségek, amelyeket pontosan meg tudnánk mérni, a helyzetet és impulzust pontosan ki tudnánk számítani belőlük. E mennyiségekkel kifejezve a kvantumelmélet valósága pontosan meghatározott és nem statisztikus jellegű lenne. A hatvanas években azonban John Bell angol fizikus, aki akkor Genfben a CERN-nél dolgozott, kimutatta, hogy bármely elméletnek, amely – mint Einstein és munkatársai elmélete – azt állítja, hogy a kísérletek mögötti valóságot írja le, tartalmaznia kell nem lokális hatásokat, amennyiben kielégít egy egyszerű aritmetikai összefüggést. A kvantummechanika megfelel a Bell-feltételnek, amely megengedi, hogy nem lokális hatások létezzenek benne. Az a hibás elképzelés, mely szerint a kvantummérések bizonytalansága pusztán a mért jelenség megzavarásában jelentkező ügyetlenségünk megnyilvánulása, nem állja ki a Bell-próbát, lévén lokális magyarázat. A kvantumbizonytalanság mélyebbre hatol, mint klasszikus megfelelője. A természet kvantumtörvényeinek tartalmazniuk kell nem kauzális és nem lokális tulajdonságokat. A kísérletekkel nem lehet összhangban egyetlen jelenlegi vagy jövőbeli elmélet sem, mely nem tartalmaz nem lokális hatásokat. Ami Bell bizonyításával kapcsolatban a legmeglepőbb, sőt egészen különleges, az az, hogy a valóság *tetszőleges* elméletének szükségszerű logikai tulajdonságát mutatja meg, nem csak megfigyelt megnyilvánulásának valamelyik tulajdonságát, mint a matematikai fizika egyéb bizonyításai: ha a valóságról alkotott elképzelésünk helyes, akkor szükségszerűen nem lokális.

És mégis, figyelemre méltó módon, a kvantummechanika nem engedi meg, hogy bármely két mérést a fénynél gyorsabban terjedő jelek kössenek össze. A pillanatszerű, nem lokális hatások, melyeknek a természet bármilyen kvantumtörvényében szerepelniük kell, nem mondanak ellent a speciális relativitáselméletnek. Einstein elmélete csupán az információ továbbításának sebességét korlátozza. Tegyük fel például, hogy robotok ezreit állítjuk sorba, és úgy programozzuk őket, hogy mindegyik egy meghatározott időpontban

kapcsolja be képernyőjét. A parancsokat előre elrendezhetnénk úgy, hogy mindegyik robot a jobb oldali szomszédja után kapcsolja be képernyőjét, de olyan hamar, hogy a tapasztalatlan megfigyelő számára úgy tűnne föl, mintha egy fénynél gyorsabb jel haladna végig a robotok sorának egyik végétől a másikig. De ez nem kihívás az Einstein-féle elmélet számára: nem lehet információt továbbítani e fénynél gyorsabban terjedő jelenség felhasználásával. Ha a robotok információt akarnának továbbítani egymásnak, akkor kommunikálniuk kellene rádiójelek felhasználásával, mondjuk, minden robot a szomszédjával. Mivel ezek a jelek nem terjednek gyorsabban, mint a fény vákuumban mért sebessége, nincsen mód arra, hogy a robotok között információ továbbítódjék a fénynél gyorsabban. Úgy voltunk képesek fénynél gyorsabban terjedő jelenséget létrehozni, hogy egymástól független eseményeket időbelileg előzetesen egyeztettünk. Nincs olyan természeti törvény, amely ezt tiltaná.

Az EPR-kísérletben ilyen típusú összefüggés van, nem történik információ továbbítása. Tudjuk, hogy az egyidejűség fogalma a megfigyelő mozgásától függ. Elrendezhetnénk úgy a dolgot, hogy három megfigyelő úgy mozogjon egymáshoz és az EPR-kísérlethez képest, hogy egyikük a két perdület mérését egyidejűnek lássa, míg a többiek az egyik vagy másik perdület mérését látnák időben előbbinek. Ha a második foton perdületét valóban az okságra alapozva határoznánk meg, jel küldésével az egyik méréstől a másikhoz akkor – a megfigyelt kvantumjelenségekhez viszonyított relatív mozgásunk változtatásával – meg tudnánk változtatni a természetben az ok és okozat sorrendjét. A kvantumvalóság okságtól független elemét nem lehet az információ fénynél sebesebb továbbítására felhasználni: az EPR nem egyenlő az ESP-vel![*]

Ha a „rejtett paraméterek" valóban léteznének, akkor az információ fénynél gyorsabb továbbítása *lehetséges* volna. Az EPR-kísérlet „rejtett paraméteres" magyarázatában van egy rejtett mennyiség, amelyet az első perdület mérése befolyásol, és amely azután valamilyen hatást fejt ki a másodiknak mért perdület értékére, még ha a mérések egyidejűek is. Ez a rejtett paraméterek egyik kellemetlen tulajdonsága, amiként az is, hogy létezésük ellentétes Einstein speciális relativitáselméletével. A speciális relativitáselmélet eddigi nagy energiájú fizikai kísérletekben történt igazolásai azonban mégsem tekinthetők a rejtett paraméterek létezésének cáfolataként, mert eddig semmiféle mérést nem tudtunk végezni rájuk vonatkozóan.

Akkoriban Bohrra az eredeti EPR-javaslat hatástalan maradt, egyszerűen

[*]ESP – *Extra Sensory Perception*, vagyis az érzékszervektől független érzékelés, mint például a telepátia. – *A ford.*

nem fogadta el a valóság EPR szerinti definícióját. Ahelyett, hogy megtartotta volna a valóságról való elmélkedés megszokott módját, és a kvantumelméletet kényszerítette volna behódolásra, inkább ennek eredményeit fogadta el, és az elmélet sikerét arra való felszólításnak tekintette, hogy meghatározza, milyen következményekkel jár ez a valóság hagyományos, realista szemléletére nézve. Fenntartotta, hogy értelmetlen próbálkozás megkülönböztetni a *valóságot* a *megfigyelt valóságtól*. Nem beszélhetünk értelmes módon egy kvantumrendszer valamelyik tulajdonságáról a megfigyelőre tett hivatkozás nélkül: a megfigyelő a jelenség része. Valóban, egy meghatározott értelemben a megfigyelő hozza létre a jelenséget. Bohr szerint nem létezik semmiféle valóság és semmilyen természeti törvény a megfigyelőtől függetlenül. A két pörgő részecske ugyan látszólag nem képes egymást befolyásolni, de – állítja – össze vannak kötve a megfigyelő jelenléte által, aki az első mérésével elhatározza a második részecske perdületének meghatározását. S ez a megfigyelőt az egész rendszer elválaszthatatlan részévé teszi. Nem tekinthetjük a két perdületet független létezőknek, ama megfigyelő beavatkozásáig, aki mérési tevékenységével elkülöníti őket egymástól. Az első *és* második mérés eredményét nem lehet előre megjósolni a mérés elvégzése előtt. Bohr úgy egészítette ki a valóság EPR szerinti definícióját, hogy magában foglalja az egész kísérleti elrendezést. A valóság kvantummechanikai leírása nem hiányos, ahogyan az EPR sugallta, csupáncsak nem lokális, és átfogóbb annál, mint amit az EPR szerzői hajlandók voltak elfogadni.

Érdekes visszagondolni arra, milyen fontos volt a tudomány fejlődése szempontjából az „izolált" rendszer fogalma. Galilei és Newton sikereinek titka egy adott fizikai jelenség idealizációjában rejlett, mely arra szolgált, hogy matematikai nyelven megalkothassanak egy olyan megközelítést, mely megragadja a jelenség lényeges tulajdonságait, és elhanyagolja a külső tényezőket. Az ősi holisztikus elvek nem adtak módszert a kezünkbe a természet megértéséhez, mert tiltották a természet olyan kezelhető nagyságú részekre vágását, melyeket külön-külön már meg lehet érteni. A megfigyelő elkülönítése a megfigyelttől ennek a darabolásnak kulcsfontosságú eleme volt. Azért működött olyan jól, mert a megfigyelők (mi magunk), műszereik (szemeink) és adatfeldolgozó készülékeik (agyunk) nagyméretű objektumok, melyek számára a megfigyelői mivolt kvantummechanikai hatásai észrevehetetlenek. Ha mikroszkopikus méretű értelmes lények lettünk volna, akkor az objektív külvilág ideáját hasznavehetetlennek tartottuk volna. A filozófia története meghökkentően más lett volna.

Érdemes itt megjegyezni, hogy a keleti miszticizmus és a kvantummechanikai eszmék divatos összekapcsolása, mellyel olyan népszerű írásokban

találkozunk, mint *A fizika Taója* vagy *A táncoló Wu-Li mesterek*, félreértésen alapul. Addig, amíg nincs eszközünk a mikroszkopikus valóság észlelésére, arra sincs okunk, hogy inkább holisztikus, mintsem mechanisztikus valóságképet alkossunk. Ilyen körülmények között a megfigyelő és a megfigyelt jelenség elválasztásának elmulasztása a természet vizsgálatának megakadásához vezet, és ahhoz, hogy lehetetlen megbízható és hasznos értesüléseket szerezni működéséről. A filozófiai holizmus állta útját a tudományos haladásnak az erős misztikus tradíciójú keleti kultúrákban. A mikroszkopikus világ valamely holisztikus elemének újabb kori felfedezése, és – utólag – emez új elem és a világra vonatkozó misztikus elképzelések közti kapcsolat megfigyelése, mindez nem történhetett volna meg azokban a kultúrákban, amelyek *ab initio* elfogadták volna ezeket a misztikus elképzeléseket.

A kvantumelméletben azokkal a problémákkal szembesülünk, amelyek az efféle nézetek szükségszerű elvetését kísérik. A megfigyelőt semmilyen értelemben sem lehet elszigetelni attól, amit megfigyel; igen nehézzé válik annak kifejtése, hogy valójában mihez képest külső a „külső világ". Az, hogy Bell kimutatta a nem lokális hatások létezését, úgy látszik, nem korlátozza a készülékből és megfigyelőből álló, Bohr által állandóan hangsúlyozott „teljes" rendszer kiterjedését. Honnan tudjuk tehát, hogy mely távoli megfigyelések *nem* hatnak a rendszer állapotára?

Bohr egykor forradalminak tekintett elképzelése vált a kvantummechanika úgynevezett „koppenhágai értelmezésévé", mert ezt akkor alkotta meg, amikor ebben a városban dolgozott, maga köré gyűjtve, tudományos műhellyé egyesítve, a kor legnagyobb fizikusait. Míg mások ádázul dolgoztak, hogy sikereket érjenek el a kvantumelmélettel, és megmagyarázzák az anyag számos alapvető tulajdonságát, addig Bohr mélyen elgondolkozott a természet kvantumtörvényeinek jelentéséről és értelmezéséről. A koppenhágai értelmezést a legtöbb kvantumfizikus elfogadná, ha arra kényszerítenék őket, hogy e legsikeresebb fizikai elmélet értelmezését megadják – habár valószínűleg kisebbségben lennének azokkal szemben, akiket ez a kérdés egyáltalán nem foglalkoztat. Ez az értelmezés azt tartja, hogy nem létezik mélyebb valóság, melyet a hagyományos értelemben felfedezhetnénk, mint a valóság leírása. A valóságot, melyet észlelünk, a megfigyelési tevékenység határozza meg. Valóban létezik, miután megmértük – nem illúzió –, de semmilyen értelemben sem mondhatjuk azt, hogy létezik a megfigyelés tevékenysége nélkül. Fel kell ismernünk, hogy olyan „dolgok", mint a neutron és a foton, nem lehetnek ugyanolyan módon „valóságosak", mint ahogyan a székeket és asztalokat gondoljuk valóságosnak. Inkább az árnyékhoz hasonlatosak: a fényforrás és a megfigyelő összekapcsolásából születnek. Az árnyékok végül is valódiak, de nem

olyan értelemben léteznek, mint például egy könyv. A valódi létezésnek az az eleme, amelyet Einstein tulajdonított a fotonnak – azért, mert a fotonnak van egy megjósolható tulajdonsága – nem jelenthet többet (ténylegesebbet), mint mérhető tulajdonságainak egyik esetleges megjelenési módját.

Ezt „kvantumidealizmusnak" vagy akár „kvantumpozitivizmusnak" is nevezhetnénk, beállítottságunk szerint. A fenti értelmezés szerint a határozatlansági elv által összefoglalt komplementaritás azt tükrözi, hogy a helyzethez és impulzushoz hasonló klasszikus fogalmak nem létezhetnek egyidejűleg, és nem alkalmasak a kvantumvilág megragadására. Annak oka, hogy e feladatra alkalmatlannak bizonyulnak, az, hogy – mint minden klasszikus elképzelés – ezek is feltételezik, hogy a dolgok tulajdonságai akkor is léteznek, ha éppen nem figyelik meg őket; Bohr szerint ilyen világ igazából nem létezik. Értelmetlen arról beszélni, hogy egy részecskének van meg nem mért perdülete, vagy azt gondolni, hogy a megmért perdület realitását egy mélyebben fekvő valóság hozza létre. Ha Bohrt arra kérték volna, hogy értelmezze a hullám jellegű képet a kettős rés neutroninterferencia-kísérletben, és a részecskékre jellemző mintázatot, mely akkor alakul ki, amikor megpróbáljuk eldönteni, melyik résen haladt át a neutron, akkor ezt ő arra tekintette volna példának, hogyan befolyásolja a megfigyelő által elhatározott mérés azt, hogy a neutront hullám vagy részecske jellegűnek fogjuk-e találni. Nincs értelme – érvelt volna – arról beszélni, hogy mi „igazából" a neutron, vagy azt gondolni, hogy a mérés valahogyan megzavarja, megakadályozza, hogy igazi valóját megmutassa. Nincsen mélyebben rejlő valóság.

Az őrületesen összekevert macska

Mint meder vizét
Folyó gyors áramában
Szikla vágja szét,
Noha elválik utunk,
Tudom, majd találkozunk.

XII. századi japán vers

Sok fizikus egyáltalán nem találja olyan csodálatosnak a „koppenhágai értelmezést". Ez az értelmezés még mindig zavarba ejtő réseket hagy a kvantumvilág megértésében. Annak elfogadását kéri tőlünk, hogy a méréseknek lehetnek nem lokális hatásai. De a koppenhágai értelmezés legkellemetlenebb problémája ennél alapvetőbb: Mit tekintsünk mérésnek? Emlékszünk, hogy amikor – Bohr szerint – végrehajtunk egy „mérést", a végtelen kiterjedésű

hullámfüggvény kénytelen „összeomlani", meghatározott, de nem megjósolható állapotba kerülni egy adott helyen – például ott, ahol a részecskét találjuk, miután a fényképlemezbe ütközött a kettősrés-kísérletben. Az átmenet a kvantumképből a klasszikusba hirtelen és misztikus. Vajon a neutron hullámfüggvényének redukcióját a lemezen keletkezett nyom mint élettelen megfigyelő okozza-e, vagy annak a fizikusnak a megfigyelési tevékenysége, aki a neutron hullámfüggvényéből és a fényképlemezből álló összetett rendszert vizsgálja? Hol és mikor omlik végül is össze a hullámfüggvény? Bohr értelmezésének problémája az, hogy valójában nem állítja, hogy leírja, melyek a kvantumállapotok és a mérőeszközök: csak kapcsolatuk természetével foglalkozik. Ez meglehetősen rejtélyes. Úgy látszik ugyanis, hogy a mérőeszközöknek, mint például a Geiger–Müller-számlálóknak vagy a fényképlemezeknek nincsen semmilyen különleges tulajdonságuk. Alapjában véve maguk is a neutronhoz hasonló kvantumrészecskékből állnak. Értelmezésében Bohr kénytelen a fizikai folyamatok bizonyos „méréseknek" nevezett csoportját különlegesnek tekinteni, mert ezek a hullámfüggvény hirtelen összeomlását okozzák. Ugyanakkor lehetetlennek tetszik bármiféle jó okot találni arra, hogy miért kell ezeket a „mérési" folyamatokat bármilyen módon különlegesnek tekintenünk. Mindazonáltal világos, hogy a mérési folyamatnak van néhány olyan tulajdonsága, melyek éppen ellentétesek azokkal a tulajdonságokkal, amelyek a hullámfüggvény Schrödinger-egyenlet szerinti determinisztikus viselkedését jellemzik a mérés által okozott összeomlás hiányában. Míg az utóbbi determinisztikus, lineáris, folytonos, lokális és független az idő folyásának irányától, addig a mérési folyamat majdnem-véletlenszerű, nemlineáris, nem folytonos, nem lokális és visszafordíthatatlan. Két jelenség már nem is lehetne ennél különbözőbb.

A hullámfüggvény kvantumviselkedése és a mérés meghatározott tevékenysége közti kapcsolat homályos voltát gyönyörűen ragadja meg egy gondolatkísérlet, melyet Schrödinger képzelt el 1935-ben. Azt írja, hogy erre Einstein, Podolsky és Rosen közleményének elolvasása indította, mely szintén 1935-ben jelent meg. Mint Einstein és munkatársai, Schrödinger sem fogadta el soha a kvantumelmélet koppenhágai értelmezését, és gondolatkísérletét olyasfajta „képtelen esetnek" tekintette, mely az értelmezés racionális voltát megkérdőjelezi. A „macska-paradoxon" így szól:

Tegyük fel, hogy bezárunk egy macskát egy szobába, ahol van egy Geiger–Müller-számláló, valamint egy radioaktív minta, mely időnként részecskéket bocsát ki. Ha a számláló egy órán belül detektálja a (gyakorlatilag véletlenszerűnek tekinthető) radioaktív bomlások egyikét, akkor egy szerkezet a szobába mérges gázt enged, amely a macskát pillanatok alatt megöli. Ha

egyetlen atom sem bomlik el az egy óra alatt, akkor a macska életben marad. A kísérlet akkor zárul, amikor egy óra múlva benézünk a szobába, hogy eldöntsük, él-e a macska vagy halott. Schrödinger azt állítja, hogy – a kvantumelmélet koppenhágai értelmezése szerint – mielőtt benéznénk a szobába, a macskának olyan hullámfüggvénye van, amely úgy írja le őt, mintha a pontosan meghatározott „élő" és „holt" állapotok valamiféle keverékében létezne. Mikor és hol változik át ez az összekevert, félig holt macska-állapot a se nem élő, se nem holtból az egyik vagy másik meghatározott állapotba? Ki vagy mi okozza a macska hullámfüggvényének összeomlását: vajon a macska, a számláló, vagy netán a fizikus? Vagy a kvantumelmélet egyszerűen nem vonatkozik „nagyméretű", összetett tárgyakra, még akkor sem, ha azok olyan, kisebb részekből állnak, melyekre pedig vonatkozik?

A macska-paradoxon végső, igencsak szokatlan fordulata F. J. Belinfante indianai fizikus nevéhez fűződik, aki felhívta a figyelmet arra, hogy a kvantumelméleti formalizmus szerint a halott macskát fel lehet támasztani pusztán azzal, hogy pontosan meghatározzuk az „élő macska"- vagy „halott macska"-tulajdonságok komplementer párját: ilyen mérések egy sorozata a macska állapotáról előbb vagy utóbb tényleg azt fogja megállapítani, hogy a macska él!

Kvantum-macskafóbia

> Ha macskámmal játszom, ki mondja meg, vajon én vagyok-e az ő játékszere s nem ő az enyém?
>
> Montaigne
> (Ford. Bajcsa András)

Schrödinger a macska-paradoxon megalkotásával azt akarta hangsúlyozni, hogy a kvantumelmélet a valóságnak nem teljes leírása. A macskáról való ismereteinket kell bizonytalannak, kevert állapotúnak tekintenünk, nem pedig magát a macskát. Bohr azonban úgy érvelt volna, hogy nem létezik a „macska önmagában", az egyedüli valóságos létező a „macskáról való ismeretünk". Továbbá Schrödinger macskájának makroszkopikus jellege valamelyest aláássa a példa jelentőségét. Azt az ellenvetést tehetnénk, hogy egy kevert állapotú macskát bizonyára fel sem ismernénk, ha látnánk; bár ma már lézerekkel képesek vagyunk kevert állapotokat létrehozni, ezek nem makroszkopikus méretűek.

Miközben néhány ismert fizikus úgy érvelt, hogy ezek a fogalmi problémák azt tanúsítják, hogy a „megfigyelt" és a „megfigyelő" hagyományos fogalma,

sőt még a klasszikus logika is felbomlik, mások – leginkább Wigner Jenő és Neumann János – azt a meglepő álláspontot támogatták érveikkel, hogy csak olyan sajátos mérőeszközök tudják a hullámfüggvény redukcióját előidézni, melyek az emberihez fogható intelligenciával rendelkeznek. Azt tartják, hogy nem lehet a kvantummechanika törvényeit teljesen következetes módon megfogalmazni, hacsak kifejezetten fel nem használjuk azt a tényt, hogy az észlelési tevékenység végső állomásai mindig tudatos lények. Ez az álláspont azt követeli tőlünk, hogy elhiggyük: az emberi tudat valami olyasmi, ami egészen eltérően viselkedik minden mástól, amit a természetben észlelünk. Arra is késztet minket, hogy eltűnődjünk azon, vajon mi fog történni, ha esetleg minden tudattal rendelkező megfigyelő kihal.

Nem kételkedünk abban, hogy az emberi agy közönséges anyagból épül fel, és a mesterséges intelligencia hívei azt mondanák, hogy nincs elvi akadálya teljesen tudatos, intelligens robotok építésének. Elképzelhetnénk egy olyan operációsorozatot, mely az agy bioáramköreit fokozatosan és egyenként szilícium anyagú integrált áramkörökkel cserélné fel. Vajon a páciens a cserék során egyszer csak hirtelen megszűnne embernek lenni, fokozottabb mértékben, mintha életfontosságú szerveit cserélnénk ki egyenként mechanikus szerkezetekre? A kvantumelmélet azonban megingatja a mesterséges intelligencia szükségszerű létezését bizonygató kezdetleges érveket. Ezek az érvek azon a premisszán nyugszanak, hogy az agy valamiféle biokémiai szerkezet, melynek működése szuperszámítógépekkel utánozható. Ha megvizsgáljuk, hogy eddig mit tudunk az emberi agyról, akkor valóban azt találjuk, hogy egy adott szintig képesek vagyunk megmagyarázni biokémiai és számítástechnikai elvekkel. De ha mélyebbre hatolunk, akkor bele kell ütköznünk a kvantumbizonytalanságba. Mindaddig, amíg nem értjük meg, hogyan működnek a kvantumszámítógépek, tudásunk hézagos marad arról, hogy milyen módon viszonyul az agy által használt, „tudatnak" nevezett sajátos szoftver az idegrendszer hardverjéhez. Paradox módon, ahogyan megpróbálunk egy megfigyelőt, mint amilyen ön vagy én, egyre kisebb mechanikai részekre bontva elemezni, egyszer csak elérjük a kvantumstruktúrák szintjét, amelynek megfigyelőre van szüksége ahhoz, hogy értelmet nyerjen.

Az emberi szintű intelligencia egyik legkülönösebb tulajdonsága az öntudat. Nem kell a próba-hiba módszerrel tanulnunk. Fejünkben szimulálni tudjuk jövendő tetteink eredményét, és ennek megfelelően előrelátóan cselekedhetünk. E képességünk lehetővé teszi, hogy létrehozzuk az absztrakciók elmebeli világát: zenét, álmokat, képzeteket, logikai rendszereket, szabályok gyűjteményét, melyek minőségükben mind különböznek a körülöttünk lévő fizikai tárgyaktól, és tudatos élményeink emocionális, gondolatokkal teli

világától. Ez utóbbi, személyes világ közvetít az ott kint lévő „dolgok" és a róluk alkotott elvont eszmék és elméletek között.

A megfigyelő által alkotott valóság egy fölöttébb hihetetlen oldalára John Wheeler hívta fel a figyelmet. Rámutatott, hogy csillagászati vizsgálódásaink mindegyike a csillagok és galaktikák milliárd évekkel ezelőtt kibocsátott fényének jelenkori megfigyelésén alapul. Az égbolton mindenhol megfigyelhető alacsony hőmérsékletű mikrohullámú sugárzás tengere annak az ősrobbanásnak a halódó parazsa, amelyből táguló világegyetemünk keletkezett. A legalapvetőbb szinten a távoli csillagokból érkező összes általunk észlelt foton kvantumhullám, melyek hullámfüggvényének a klasszikus meghatározottság állapotába történő összeomlását a detektorok és az őket megfigyelő csillagászok okozzák. Vajon azt jelentené ez, hogy bizonyos értelemben ezeket a csillagászati objektumokat, sőt az egész világegyetemet *mi* hozzuk létre, amikor manapság megfigyeljük őket?

A tudat teremtette valóságot feltételező vélemények legkellemetlenebb problémája e nézet közeli rokonsága a „kvantumszolipszizmus" egyik formájával, tekintettel a világ különböző személyek általi megfigyeléseinek egyezésére. Hogyan lehetséges az, hogy az egyes elkülönült emberi elmék, melyek oly hevesen vitatkoznak az abortusztól a zsurnalisztikáig mindenről, teljesen egyetértenek abban (amennyire ezt meg tudjuk ítélni), hogy melyek a kvantumvalóság megfigyelt tényei, mi az eredménye a kettős rés neutroninterferencia-kísérletnek, hogyan néznek ki a csillagok, és mi a különbség egy élő és egy halott macska között? Másrészt Bohr megfigyelő teremtette valóságának legzavaróbb problémája annak kimutatása, hogyan különbözik az nemcsak nevében, hanem valójában is a tudat teremtette valóság elképzelésétől; ez a probléma abból fakad, hogy különleges rangot tulajdonít a folyamatok „mérésnek" nevezett csoportjának.

Hány világra van szükségünk?

> Azt hiszem, elég valószínű, hogy valamikor a jövőben kifejleszthetünk egy javított kvantummechanikát, amely vissza fog térni a determinizmushoz, és így igazolni fogja Einstein nézeteit. De a determinizmushoz való ilyetén visszatérés csak azon az áron volna lehetséges, hogy más eszméket, melyeket ma kétely nélkül elfogadunk, fel kellene adnunk.
>
> Paul Dirac

A természet kvantumtörvényei a fizikai valóság megfigyeléséből eredtek, és az atomszerkezet elképesztően pontos leírásával szolgáltak, de Bohr kezében

arra a következtetésre vezettek, hogy az őket szülő valóság nem létezik úgy, ahogyan azt a naiv realisták feltételezték. A mérési tevékenység létrehozta valóság fogalma két zavaró problémát teremtett: Mi is igazából a mérés, és hogyan omlik össze hirtelen a hullámfüggvény azért, hogy megadott helyet biztosítson, amikor a részecske helyzetét meghatározzuk? 1957-ben Hugh Everett III, John Wheeler doktorandusz hallgatója a princetoni egyetemen a probléma szélsőséges, de logikus szemléletét dolgozta ki. Mi történik, kérdezte, ha a kvantumelmélet formalizmusát szó szerint vesszük? Tegyük fel, hogy az valóban mindent leír, még a mérési folyamatot is. Mi van akkor, ha a hullámfüggvény *egyáltalán nem* omlik össze? Az eredmény egy – a kvantummechanika realista értelmezéséhez a lehető legközelebb eső – elképzelés, de az ár, amelyet fizetnünk kell érte, igen magas. Ahhoz, hogy ezt a realista szemléletet következetesen fenntartsuk, a valóságról alkotott elképzelésünket gyökeresen át kell alakítanunk.

Everett szerint, amikor egy mérés megtörténik, a megfigyelő állapota felhasad az összes olyan lehetőség halmazára, melyek a koppenhágai értelmezés szerint lehetségesek. Míg Bohr elképzelése a determinizmus megszűnéséhez vezet, mert a mérés egy bizonyos kimenetelének csak a valószínűségét tudjuk megjósolni, addig Everett kitart amellett, hogy a determinizmus teljesen érvényesül: a mérés összes lehetséges kimenetele megtörténik. Egyikük státusa sem különbözik a többiétől. Mind egyformán valóságosak, ugyanolyan valóságosak, mint bármi más, amit a laboratóriumban mérünk vagy észlelünk. A megengedett kimenetelek minden lehetséges sorozata elkülönül egymástól. Mi pedig egy olyan múltat észlelünk, mely az egyik ilyen sorozat elemeiből tevődik össze.

A kvantummechanika e különleges, „sok világ"-értelmezését csak egyetlen ok miatt veszik komolyan: ha azt tartjuk, hogy a kvantummechanika a természet egészére vonatkozik, akkor az elmélet matematikai formalizmusából tagadhatatlanul következik ez az elképzelés. Ahhoz, hogy következményeit elkerüljük, fel kell tételeznünk, hogy a kvantummechanika a mérési folyamatot nem írja le.

Láthatjuk, hogy a „sok világ"-értelmezés elvileg determinisztikus. A hullámfüggvény időbeli viselkedéséből meg tudjuk jósolni az összes jövőbeli állapotot, melyek a megfigyelő állapotának felhasadásából létrejöhetnek. Paradox módon azonban saját állapotunk múltbeli alakulását nem tudjuk megállapítani, mert nem ismerjük az összes többi elágazó ösvényt, melyeket saját állapotunk nem követett kialakulása során. Előre tudjuk látni a kvantumokok hatásait, de a kvantumhatások okait nem tudjuk megtalálni. A „sok világ"-értelmezés azzal gyakorol logikai vonzóerőt támogatóira (kiknek soraiban ott van néhány a világ legnagyobb kvantumfizikusai közül), hogy elkerüli a „tudat" és „meg-

figyelő" fogalmának használatát, illetve a rendszer és a mérőeszköz skolasztikus megkülönböztetését. Feltehetőleg az elemi részecskék minden kölcsönhatásának elágazásokat kell létrehoznia saját univerzumaikban, tehát nem csak azok a kölcsönhatások eredményeznek elágazásokat, amelyeket a Bohr szerinti értelemben „megfigyelünk". Ennek fényében Bohr értelmezése némileg prekopernikuszinak tűnik föl, mert különleges rangot biztosít önnönmagunknak, melyet Everett megtagad tőlünk. Valójában ez egyfajta vitalizmus.

A macska-paradoxon everetti értelmezése igen egyszerű. A kísérlet eredményeként a megfigyelőnek két egyformán valóságos állapota fog létezni: az egyik egy élő macskát lát a dobozban, a másik egy holtat. Mindkét kimenet egyformán valóságos. Mi ezek közül csak az egyiket éljük át. A „sok világ"-értelmezés úgy tekinti a hullámfüggvényt, mint ami a kettősrés-kísérletben a cél felé haladó neutron pontosan meghatározott leírását adja. A hullámfüggvény felhasad az összes lehetséges állapotra, hogysem egy bizonyos állapotba omlana össze. A mérési tevékenységek helyett csak különböző állapotok közötti összefüggések léteznek. Everett számára a hullámfüggvény összeomlásának fogalma pusztán annak következménye, hogy mi, akik arra vagyunk korlátozva, hogy újra és újra felhasadó szkizofrén valóságunknak csak egyetlen elágazó ösvényén kanyarogjunk, nem tudunk a kvantumvalóság teljességével kapcsolatba lépni.

E forgatókönyvnek egészen különleges következményei vannak: miként Borges* írói világában, minden, ami logikailag megtörténhet, meg is történik. Vannak olyan világok, melyekben sohasem halunk meg. Az élet evolúciójának a világegyetemben, függetlenül attól, hogy mennyire valószínűtlen, meg kell valósulnia. Valamennyiünk létezése folytatódik mindaddig, amíg csak létezik tér és anyag, hiszen még ha meghalunk is ebben a világban, van egy másik, ahol tovább élünk, *ad infinitum*. Milyen ironikus, hogy a tudat kialakulása a kvantummechanikának csak azon értelmezése szerint szükségszerű, amelynek nem kell feltételeznie a tudat létezését ahhoz, hogy a kvantumvalóságot létrehozza. Az is igaz, hogy a kvantumvalóság „sok világ"-értelmezése az egyedüli olyan elmélet, amely nem igényel nem lokális kölcsönhatásokat: Bell tétele nem érvényes rá. A sok különálló világ létezésére azonban nehéz volna azt mondani, hogy lokális jelenség.

Bármilyen egyszerű is Everett értelmezése, ahhoz, hogy elfogadjuk a valóságos világok végtelen sokaságának gondolatát, a hitetlenség éppoly nagy-

*Jorge Luis Borges argentin író, műveiben gyakran szerepelnek labirintusok, párhuzamos világok. A szerző itt *Az elágazó ösvények kertje* c. novellára utal. – *A ford.*

mértékű feladása szükséges, mint ahhoz, hogy elfogadjuk Bohr állítását, mely szerint egyáltalán nem létezik valóságos világ. A „sok világ"-értelmezés rejtélyes problémákat vet fel. A tudatos elme az Everett-féle elágazó ösvények közül miért csak egynek lehet tudatában? Az egyszer elágazott ösvények újra találkozhatnak-e megfigyelhető eredménnyel? Kapcsolatba tudunk-e lépni e „más világokkal"? Everett elképzelése azért játszik egyre nagyobb szerepet az elméleti fizikában, mert a kozmológia kutatói és a részecskefizikusok elkezdték egyesíteni erőiket. Közös céljuk a tömegvonzás kvantumelméletének megalkotása. Jelenleg egy efféle szintézis a lehető legrémesebb házasságnak tetszik. A kvantumelméletből hiányzik az általános relativitáselmélet ama kifinomult sajátsága, hogy benne a tér lokális geometriáját és az idő folyásának sebességét a térben lévő tömeg és energia alakítsa ki. Az általános relativitás elméletéből hiányzik a kvantumvilág lényegi bizonytalansága és komplementaritása. Azt, hogy e két hatalmas fizikai elmélet összeolvasztásából származó egyesített elmélet milyen furcsának bizonyulhat, meg tudjuk ítélni, ha elgondolkozunk házasságuk következményein. Az általános relativitás elmélete azt állítja, hogy a tömegek jelenléte és mozgása a térben és időben az, ami a tér szerkezetét és az idő folyásának sebességét meghatározza. Ugyanakkor a kvantumelmélet szerint soha nem tudjuk a térben és időben mozgó tömeg sebességét és helyzetét egyidejűleg tetszőleges pontossággal megállapítani. Hogyan ismerhetjük meg, ezek után, a téridő-kontínuumot, amelyben a tömegeket el kívánjuk helyezni? Ördögi körbe kerültünk. E nehézség ellenére tettek már előzetes próbálkozásokat a kvantumgravitáció keresztezett elméletének kidolgozására. Az új szintézis elsődleges alkalmazása az lesz, hogy az egész univerzumot leíró kvantumelméletet szolgáltat majd, melyet úgy használhatunk, ahogyan Einstein elméletét használjuk jelenleg egy nem kvantált kozmológiai elmélet felépítésében. Ez az a pont, ahol Everett értelmezése nélkülözhetetlenné válik, mert egyébként fel kellene tennünk a kérdést: „Ki vagy mi okozza a világegyetem hullámfüggvényének összeomlását?" – egy „Végső Megfigyelő" a világ végén, vagy mindenestől a világegyetem téridején kívül? Nem véletlen, hogy a kvantumvalóság „sok világ"-értelmezésének összes fontos híve valamilyen módon elkötelezettje a kvantumkozmológiának.

A kvantumelmélet világegyetemre való bármely alkalmazásának másik mély elvi problémája az idő különleges helyzete a kvantumelméletben. A Schrödinger-egyenlet állandó állapotra vonatkozó megoldása a világegyetem hullámfüggvényére nem tartalmaz olyan mennyiséget, melyet „időnek" nevezhetnénk. Eltérően a mozgás kvantumelmélet előtti teóriáitól, úgy látszik, nincs természetes mód arra, hogy az idő fogalmát beillesszük a képbe. A kvantummechanika világra való alkalmazásai során mindenütt az idő sajátos felfogása jelenik meg,

oly módon, mely nem jellemző a kvantumelmélet előtti természettörvényekre. A Heisenberg-féle határozatlansági elv egyes változatai azt állítják, hogy az idő és energia egyidejű mérése nem lehetséges nagyobb pontossággal, mint a Planck-állandó. Ez azonban csupán annak az időnek a mérését korlátozza, amelyet a megfigyelt állapot belső lényege határoz meg. Az nincs korlátozva, hogy milyen pontossággal mérhetnénk meg az időt és energiát egyidejűleg, ha a méréshez az idő valamilyen külső mértékét használnánk.

A kvantumtörvényhozás

> Ha az a benyomásom támad, hogy minden egyes esetben, amikor a kvantumelmélet egynél több lehetőséget enged meg, a természet saját maga választ, akkor személyiséget tulajdonítok a természetnek, tehát valami olyannak, ami mindig és mindenütt létezik. Mindenhol örökösen létező személyiség, amely mindenhatóként dönt azokban az esetekben, amelyeket a fizika törvényei eldöntetlenül hagynak: s ez nem egyéb, mint amit a vallás nyelvén Istennek neveznek.
>
> F. J. Belinfante

A kvantumvilágot leíró törvények a szó sokféle értelmében elképesztőek. A legpontosabb eszközök, melyeket valaha is találtunk a természet működésének sikeres előrejelzésére és leírására. Egyes esetekben az egyezés az elmélet által jósolt érték és mérési eredményeink között igen jó, kevesebb, mint az érték egymilliárd része. Mégis, amikor alapjukig követjük e törvényeket, akkor a valóság olyan elképzeléseinek irányába kényszerítenek minket, melyek teljesen ellentmondanak a valóságról alkotott mindennemű intuíciónknak és a józan észnek. Struktúrák figyelemreméltó mélységeit és újszerűségét tárják fel egy olyan matematikai formalizmusba rejtve, melyet más, gyakorlatiasabb célok érdekében dolgoztunk ki.

Úgy gondolhatnánk, hogy a kvantumelmélet értelmezését illető alapvető tudatlanságunk veszélyezteti e teória sikeres felhasználását. Semmi sem lehetne messzebb az igazságtól. Ez idáig a gyökeresen különböző kvantumontológiák nem vezettek eltérő előrejelzésekhez egyetlen kísérlet eredményét tekintve sem. A várt nem lokális jelleget Aspect kísérletei megerősítették. A koppenhágai és a „sok világ"-értelmezés teljesen különbözik egymástól, mégis széles körben elterjedt az a vélemény, hogy kísérletileg nem különböztethetők meg. Ez a nézet azonban hamisnak bizonyulhat. Nemrég David Deutsch azt vetette fel, hogy egykor majd lehetséges lesz kvantumszámítógépeket tervezni, melyek működése attól függ majd, hogy a „sok világ"-értelmezés igaz-e vagy sem.

A kvantumszámítógépek építése izgalmas lehetőség lényegükből eredő párhuzamos információfeldolgozó képességük miatt. Ha a kvantumszámítógépen végzett egyórányi számítás egyenértékű a nem kvantumos, soros működésű gépen végzett kétórányi munkával, akkor – érvel Deutsch – arra a következtetésre kell jutnunk, hogy e számítások egy részének másik világokban kellett végbemennie. Részletesen kidolgozott javaslatának újdonsága az, hogy kihasználja azt a tulajdonságot, hogy lehetséges olyan kvantumszámítógépet tervezni, mely a valóságot különálló „világokra" hasítja, majd újra egyesíti, és *emlékszik arra, hogy korábban felhasadt*. Ez a tulajdonság biztosítja, hogy a számításokat egy kvantumszámítógép gyorsabban fogja végezni, mint nem kvantumos megfelelője, s ez megkülönbözteti majd Bohr és Everett értelmezéseit.

A legnyilvánvalóbb probléma ezzel az izgalmas elképzeléssel az, hogy bár a kvantumrendszer újraegyesítése papíron esetleg lehetséges, még arra is szükség van, hogy a számítás eredményét adó állapotot a gépből kinyerjük a programfuttatás végén. A kísérletet valamelyik szintjén korlátozni fogja az a nem kvantumos jellegű probléma, hogy miképpen juttassuk az információt a gépbe, és hogyan nyerjük ki belőle anélkül, hogy alapvetően visszafordíthatatlan módon megváltoztatnánk.

Van még egy utolsó válasz a kvantumvalóság dilemmáira, mely összhangban van az elmélet kifejlesztői közül sok „nagy öreg" álláspontjával: lehet, hogy a kvantummechanika nem igaz. Eddig ugyan még sohasem mondott ellent a kísérleteknek – valójában, e mérce szerint a kvantumelmélet a természet leglátványosabban sikeres elmélete, mely valaha is rendelkezésünkre állt. Azt jósolja, hogy az elektron mágneses impulzusa

1,001 159 652 46,

és a legújabb kísérletekben azt találják, hogy annak értéke

1,001 159 652 21

– az utolsó két tizedesjegy mindkét esetben bizonytalan. Ez egy a tízmilliárdhoz pontosság! Nyilvánvaló, hogy ha a kvantumelmélet „rossz", akkor vagy olyan környezetben mond csődöt, mely tapasztalatainktól egészen idegen, vagy alkalmazása nagyméretű és összetett rendszerekre valamilyen módon helytelen, mert ott a szerveződés új, magasabb szintű törvényei lépnek spontán módon életbe. Ez az a klasszikus helyzet, amikor a „tiszteletben megvénült" természeti törvényeket már nem találjuk kielégítőnek. Newton gravitációs és mozgástörvényeiben nem kételkedtek majdnem kétszázötven évig, mindaddig,

amíg az erős gravitációs terek és gyors mozgások rendkívül pontos megfigyelése fel nem fedte, hogy e törvények csupán bonyolultabb törvények első megközelítései.

Einstein, Podolsky és Rosen nem a kvantummechanika mint a tapasztalat leírásának szabatos voltát kérdőjelezte meg, hanem azt, hogy *teljes-e* mint a valóság összes oldalának leírása. Schrödinger nem hitte el, hogy egyenlete alkalmazható volna olyan objektumokra, melyek egy macskáéhoz hasonló, összetett bonyolultsággal rendelkeznek. Lehet, hogy igaza volt. Lehet, hogy a Schrödinger-egyenlet, mely a hullámfüggvény lineáris, időben reverzibilis viselkedését írja le, csak közelítése egy bonyolultabb, *nemlineáris* egyenletnek, melynek megoldásai irreverzibilisek, és így rendelkeznek a mérési folyamat lényeges tulajdonságaival. A jövőben esetleg tüzetesen megvizsgálhatjuk ezt a lehetőséget a viszonylag sok atomból álló, alacsony hőmérsékletű rendszerek kvantumviselkedésének feltárása útján. Még nagyobb méretű rendszerekre áttérve azt gyanítjuk, hogy a kvantumelmélet néhány szokatlan módosításon megy át, mikor egyesítik a gravitáció elméletével. E módosításoknak mélyreható következményei lesznek mind a kozmológia, mind pedig az elemi részecskék fizikájának értelmezését illetően. Történetünk most a külső és belső terek messzi távlataira tér át.

4

Külső és belső tér

Az igaz, erős és ép lélek arról ismerszik meg, hogy egyaránt képes a magáévá tenni a nagyot s a kicsinyt.

Samuel Johnson

A díszletek elhelyezése

A fizika eredetileg leíró jellegű makrofizikaként alakult ki, amely roppant nagyszámú, egymással látszólag össze nem függő empirikus törvényt foglalt magában. Lehet, hogy egy tudomány kezdetekor a tudósok nagyon büszkék arra, hogy törvények százait fedezik fel. Ahogy azonban a törvények szaporodnak, a dolgok ilyetén állása boldogtalanná teszi őket: elkezdenek alapvető elvek után kutatni.

Rudolf Carnap

A relativitás és a kvantumelmélet századunk első évtizedeiben történt kidolgozása megvetette a világegyetem asztronómiai birodalma és a szubatomi elemi részecskék mikroszkopikus világa mélyebb megértésének alapjait. Utólag észrevehetjük, hogy ezek az elméletek gyökeres változásokat idéztek elő a természeti törvények értelmezésében. A kvantumelmélet feltárta, hogy a mikrovilág legmélyebb törvényei különös, megfigyelhetetlen dolgok viselkedését szabályozzák. Ez a szemléletességnek és a „józan észnek" mint a tudomány két megbízható vezérelvének a végét jelzi. Nem bízhatunk többé abban a viktoriánus elképzelésben, hogy mindent leírhatunk egyszerű mechanikus modellekkel – az atomok nem úgy viselkednek, mint a krikettlabdák, és a tér sem olyan lapos és egyenes, mint egy biliárdasztal felszíne. A kvantumelméletben megjelenő komplementaritás azt tükrözi, hogy klasszikus fogalmaink képtelenek megragadni a világ gazdag és bonyolult mivoltát, és megszünteti a megfigyelő és a megfigyelt közti, őket egymástól elszigetelő karteziánus választóvonalat. A naiv realizmus halott.

A relativitáselmélet megmutatta, hogy tapasztalataink alapja – a tér és idő, melyben létezünk és mozgunk – ugyanolyan képlékeny, mint egyéb ismert

dolgok. A tér és az idő nem csupán alapvető kategóriák, melyek keretében tapasztalatainkat el kell rendeznünk; ezek a tapasztalatok befolyásolják őket. Az idő múlásának sebessége, a tér geometriája – helyileg mindkettőt a világegyetemben található anyag határozza meg. A tér görbületét és az azt befolyásoló tömegeket nem tudjuk megkülönböztetni: egymással egyenértékű fogalmak ugyanazon jelenség leírására.

Az einsteini téridő-elképzelések fennhatósága alá eső terület, ahol hatásainak gyakorlati jelentősége van, hagyományosan az asztronómiai tér. Csak nagy távolságokon és csak nagy anyagsűrűsödések környezetében nyilvánulnak meg az Einstein-féle hajlékony téridő finom hatásai olyan mértékben, hogy jelenlegi műszereink érzékenységi tartományába esnek. A kvantumelméletnek viszont a roppant kis méretű dolgok világában van gyakorlati jelentősége, ahol a részecskék de Broglie-féle hullámhossza összemérhető méretükkel vagy nagyobb annál. Szinte minden, kisszámú atomnál nagyobb méretű rendszer leírásában lényegtelen részlet a kvantumelmélet. Legtöbb tapasztalatunk, sőt még a kísérleti fizikusok tapasztalata szerint is furcsa módon elkülönülnek egymástól azok a területek, amelyek a kvantumelmélet, illetve a relativitáselmélet fennhatósága alá tartoznak. Mi egy köztes világban élünk, melyben a tárgyak túl kicsinyek és túl lomhán mozognak ahhoz, hogy a relativitáselmélet hatásai nyilvánvalóak legyenek, ugyanakkor túl nagyok ahhoz, hogy kvantumbizonytalanságuk észrevehető legyen. Szerencsések vagyunk, hogy a természet e létrájának közepén álldogálunk – a fizikai világ sokkal egyszerűbbnek látszik e köztes világ polgára számára, a kvantumvilág „ördöge" és a görbült tér „kék óceánja" között. Itt azok a bonyodalmak jelentkeznek, melyek nagyszámú atom és molekula együttes viselkedéséből erednek. E bonyodalmak közül az egyik legvonzóbb az a szénből, hidrogénből, nitrogénből, oxigénből és foszforból álló spirális szerkezet, melyet DNS molekulának nevezünk – bonyolultságából származik az „életnek" nevezett jelenség. Szerkezete nem egyszerű. Ha az volna, akkor mi lennénk túl egyszerűek ahhoz, hogy megértsük.

Mértékegységeink, melyeket elfogadtunk és örököltünk, tanúsítják szűk látókörű gondolkodásunkat. Sok közülük – a láb, a yard, az arasz, a könyök – antropomorf, az emberi testrészek méreteiből ered. Másokat, mint például a napot és az évet, a Föld periodikus mozgása szabja meg. Legújabb kori metrikus egységeink, mint a gramm és a centiméter, mindennapi mennyiségek alkalmasnak tetsző leírásából származnak. Természetes, hogy elkábulunk, amikor azt halljuk, hogy a világegyetem 15 000 000 000 éves, vagy azt, hogy a hidrogénatom súlya körülbelül 1 000 000 000 000 000 000 000 000-szor kisebb egy grammnál; e hatalmas számok jelentősége azonban az, hogy felfedik, milyen különös az ember helyzete, félúton a tér végtelensége és a természet

legbensőbb jelenségeinek mikrokozmosza között. Nem arról van szó, hogy a világegyetem vagy az atom méretei különösek, inkább a mi köztes helyzetünk az, ami a valóság mindkét végletét oly távolinak láttatja. Körülbelül ugyanannyi csillag van a világegyetemben, ahány atom egy kockacukorban. A végső természeti törvények kutatásának frontvonala azonban olyan helyzetre lelt, melyben a nagyon nagy és nagyon kicsiny dolgok törvényeinek össze kell ütközniük. Egyedül ebben a környezetben lehet lehetőségünk annak megértésére, hogy mennyire egyszerűek vagy mennyire bonyolultak a természet alapvető törvényei. Jelen fejezetben a külső és belső terek eme összeütközésére és az azt szabályozó törvényekre fogjuk összpontosítani figyelmünket. Ez a mai fizika frontvonalába vezet majd el bennünket, feltárván a természet és törvényei bármiféle egyszerű leírásának új kihívását. Történetünk a kicsiny dolgok univerzumában kezdődik.

Világ a világban

Ha a világnak nevezett holmi
Véletlen űzte atomok műve
Mely bár soha nem szűnik fordulni,
Nem fárad tőle,
Ám arra mégsem felelet,
Hogy te szép vagy, s én szeretek.

John Hall

Az, hogy az anyag oszthatatlan mikroszkopikus részecskékből áll, régi elképzelés, mely a természetfilozófia racionalizálásának részeként a görögöktől származik, de egy ideig háttérbe szorult, amíg csak William Occam fel nem támasztotta a középkorban. Az ókorban nem volt és nem is lehetett kísérleti bizonyíték egy ilyen elképzelés alátámasztására. Az „atomizmus" természetfilozófiaként keletkezett, a dolgok szélesebb körű szemléletén belül, nem pedig általunk tudományos törvénynek tekintett elképzelésként. Egyes görög gondolkodók, mint például Arisztotelész, ellenezték az „atomizmust", mert azzal az elvakult törekvéssel azonosították, amely a puszta véletlen előnyben részesítésével megtagadja a természettől az irányítást. Az atomok nem igényeltek isteni közreműködést. Végtelen ideje léteztek már. Mozgásuk semmilyen módon nem következett saját belső tulajdonságaikból: nem rendelkeztek vég-okkal. Az ilyen „járulékos" tulajdonságok, az anyagi okokhoz hasonlóan, az arisztotelészi nézetekben másodlagos szerepet játszottak. Az összetételt és mozgást meghatározó lényeges tulajdonságok a formális és vég-okok voltak.

Arisztotelész arról is meg volt győződve, hogy az emberi tudásnak az érzékelésen kell alapulnia. Elszánt empirizmusa miatt visszariadt attól az atomista feltevéstől, mely szerint a valóság alapját megfigyelhetetlen mikroszkopikus részecskék alkotják.

Az atomizmust századokon keresztül az ateizmussal és a legrosszabb fajta materializmussal azonosították, és olyasfajta indulatokat keltett, amilyeneket még ma is ébreszt az „evolúció" az USA déli államaiban. Véletlenszerűséget és rendezetlenséget sejtetett, éppen azt az állapotot, melyet a Teremtő annak idején felszámolt. A redukcionizmus végletes formájának bátorítása felé hajlik, mely nézet mindent atomokra szűkít, és ezért mindent „csak atomokból" állónak tart. E felfogás legmeggyőzőbb kifejtését Lucretius *A természetről* c. művében találjuk, melyben az emberi tudat, test és lélek halandósága mint következtetés abból a tényből vonandó le, hogy azok atomokból állnak. A korai atomista doktrína egy másik ateista gondolattársítása az az állítás volt, mely szerint végtelen számú világ létezik, melyek mindegyike az atomok véletlenszerű összekapcsolódásából származik. Egy ilyenfajta kozmogóniai szertelenség csökkenteni látszott világunk teremtett rendjének nagyszerűségét.

Keleten az atomizmus eszméje nem tudott erőteljesen kibontakozni. Rövid időre felbukkant az i. e. IV. század filozófusának, Hui Sinek írásaiban, aki Zénónhoz hasonlóan vonzódott a végtelennel kapcsolatos paradoxonok iránt. Írásaiban bevezette a „kicsiny egység" fogalmát, mint a természet legkisebb elemét, mely semmit nem foglal magában. Az efféle eszméknek nem volt sok esélyük a túlélésre a kínai szellemi környezetben, és – Zénón gondolataihoz hasonlóan – a bírálatok hatására hamarosan feledésbe merültek. Manapság a fizikusok a végtelenségig való felosztás matematikai paradoxonjait még csak a kérdéshez tartozónak sem tekintenék. A matematikai és fizikai felosztható megkülönböztetését először Averroës, a XII. századi arab filozófus elemezte és fogta fel helyesen, azt állítván, hogy a végtelenségig való oszthatóság nem fizikai fogalom, mert a gyakorlatban nem valósítható meg.

A keleti gondolkodás holisztikus elfogultsága olyan nézeteknek kedvezett, melyek szerint a természet alapvető alkotóelemei hullámszerű, ellentétekben gazdag behatások: egybeolvadásukból könnyedén keletkeznek látható tárgyak és struktúrák. A világmindenséget a kínaiak egyetlen darabból szőtt egésznek tekintették; bár léteztek különálló tárgyak és az egész elkülönült darabjai, ezeknek csak úgy volt értelmük, mint a természet nagy szimfóniájába közvetlenül és harmonikusan illeszkedő akkordoknak. Az atomizmus a természet folytonosságába és egységébe vetett hitük megcsúfolása lett volna. Ezzel szemben az indiai és arab kultúrák rokonszenveztek a görögök atomizmusával sok közös vonást mutató eszmékkel. Az iszlám világban gyakoriak voltak a termé-

szet atomista felfogásához való ragaszkodásra késztető teológiai jellegű elgondolások. Nevezetesen az atomizmust a világ olyan tulajdonságának hitték, mely szükséges ahhoz, hogy Isten minden létezőt módszeresen számadásra kényszeríthessen az utolsó ítélet napján (érdekes itt megemlíteni, hogy nem a végesség, hanem a *megszámlálható* végtelenség Cantortól származó fogalma az, ami egy ilyenfajta módszeres elszámoláshoz szükséges).

Az a görög elképzelés, mely szerint az anyagot oszthatatlan, alapvető részecskék alkotják, először az i. e. V. században jelent meg, és arra szolgált magyarázatul, hogy miképpen változhatnak a dolgok kis mértékben, miközben lényegi azonosságukat megtartják. Minden anyagi és szellemi dolog, még az istenek maguk is, feltételezésük szerint „atomokból" épültek fel, és az *atomosz* görög szó oszthatatlant, elvághatatlant jelent (a középkor idejére ezt a szót már latinosították, és csak az idő legkisebb egységét jelentette). Később aztán az a törekvés, hogy az oszthatatlan „atomokat" a püthagoreusok által bevezetett, végtelenül kicsiny geometriai pontokkal azonosítsák, ellentmondásokat szült, és Zénón jól ismert, végtelennel kapcsolatos paradoxonjaihoz vezetett. Ezekkel azt akarta kimutatni, hogy a természet alapjában véve a térben folytonos, nem pedig szakadásos, amint az a térben elkülönülő atomok létezéséből következne.

Nem minden korai görög atomista feltételezte, hogy az atomoknak szükségszerűen kicsiny méretűnek kell lenniük. Csupán azt kötötték ki, hogy oszthatatlanok legyenek – olyan tulajdonság ez, amely nem zárja ki, hogy valamiféle szerkezetük lehet. Azt képzelték, hogy különböző méretekben és alakokban léteznek, de az egyikfajta atomot nem lehet átalakítani a másikba. Mindig mozgásban vannak, és nem feltétlenül tömörülnek össze, hanem „üresség" választhatja el őket egymástól. Az atomok tulajdonságait tekintették az anyag egyedül „valóságos" sajátságainak. Más tulajdonságokat, mint a színeket, ízeket, szagokat, melyek nagyméretű atomhalmazokban jelentkeznek, az emberi érzékelés másodlagos termékeinek tekintették. Így például azt a tényt, hogy egyes anyagok sűrűsége nagyobb, mint másoké, úgy magyarázták, hogy több atomot tartalmaznak, az anyagok töréssel szembeni ellenálló képességét pedig az atomjaik közti üresség eloszlása alapján, és így tovább. Az ilyenfajta „magyarázatok" igazából nem megfigyelt adatokon alapultak, hanem azok alátámasztására szolgáltak. Az atomok és az üresség elválasztása azért volt jelentős, mert először tulajdonított létezést a légüres térnek. Erre azért volt szükség, hogy a mozgás megmagyarázható legyen. Ha ugyanis minden létező atomokból áll, akkor – mivel az atomok csak érintkezés útján képesek egymásra hatni – létezőből nemlétezővé kellene válniuk ahhoz, hogy mozoghassanak. Annak a hatóerőnek, melynek révén egy részecske érintkezés nélkül

befolyásolhat egy másikat, nem volt megfelelője az atomizmusban. Viszonylag újkeletű elképzelés ez, még Newtont is nyugtalanította, hogy használnia kellett, és használni is csak az instrumentalizmus szellemében használta.

Maguk az atomok valamilyen misztikus elsődleges anyagból álltak. A négy őselem – föld, levegő, tűz és víz – a feltevések szerint az atomok meghatározott, de látszólag véletlenszerű mozgásából keletkezett, az atomi ütközések nyomában keletkező örvényekben összesűrűsödve. Különös, hogy – bár Démokritosz és Leukipposz eredeti elképzelése az atomok mozgását meghatározottnak tartotta – később az epikureus atomistáknak ezt az elképzelést módosítaniuk kellett azért, hogy megőrizhessék a szabad emberi akarat iránti hódolatukat. E cél érdekében bevezették azt az elképzelést, mely szerint léteznek „elhajlásnak"* nevezett, véletlenszerűséget okozó belső tényezők, melyek az atomok mozgását megjósolhatatlan módon befolyásolják. Minél nagyobb valamely létező teljes „elhajlás-tartalma", annál inkább szellemi és annál kevésbé anyagi. A szeszély e szellemi hierarchiájának csúcsán találjuk az akarat trónját: az emberi lelket.

Noha Arisztotelész szembeszállt a valóság atomista felfogásával, az élő szervezetekre vonatkozóan a „minima naturalia" elméletét fejtette ki. Azt állította, hogy egyetlen testet sem lehet végtelen számú részre felosztani. Minden testnek vannak kisebb részei, de ezeket a benne előforduló anyagtípusok természete határozza meg, e részek pedig megváltozhatnak és elpusztulhatnak. Így tehát a minimális részek azok, amelyeknél kisebb részekre osztás a test önmagával való azonosságának elvesztését okozza. Különös, hogy Arisztotelész eszméjét a középkor folyamán megőrizték és tökéletesítették, és már akkor beépítették a skolasztikus filozófia labirintusába, amikor az atomista nézeteket még ellenezték. Ily módon az atomisták eszméje, ha szóhasználatuk nem maradt is meg, megőrződött.

Bár az atomista elképzelések mai szemmel nézve látszólag sokkal ígéretesebbek az alaptudományok számára, mint metafizikusabb versenytársaik, az ókorban nem váltak nagy hatású tényezővé; ez a rang az arisztotelészi rendszert illette meg. A középkor után az anyag „atomi" oszthatóságának elképzelését európai tudósok, Kopernikusz, Sennert, Basso, Van Goole, Gassendi, Huygens és Boyle élesztették fel az ókori atomista írások korai XV. századi felfedezését és újrakiadását követően. Az atomista nézet elfogadása, mint korábban, így most is elsődlegesen egy adott filozófiai beállítottság eredménye

* A függőlegestől való eltérésnek; Démokritosz és Leukipposz ugyanis az atomokat függőleges zuhanásban lévőknek képzelte. – *Fehér Márta*

volt.* Egyszerűen kényelmes volt a természetet szilárd, észrevehetetlen téglákból állónak tekinteni. Az atomok semmiféle elméletben nem játszottak szerepet, és nem voltak megfigyelhetők sem (Gassendi idejében a legkisebb észlelt objektumok mintegy 1/1000 milliméter átmérőjűek lehettek). Azért volt szükség rájuk, hogy megérthessék, miképpen lehetnek azonos méretű, alakú és mozgású testek mégis olyan nyilvánvalóan eltérőek. Francis Bacon a „természet felfedésében" rendkívül hasznosnak tekintette őket, függetlenül attól, hogy léteznek-e vagy sem. Ezzel az instrumentalista nézettel állt szemben az anyag végtelen oszthatóságának karteziánus eszméje. Az egyik vagy másik nézetet igazoló bizonyítékok szinte teljes hiányában az atomista elképzeléseknek kétségtelenül lendületet adott Hooke *Micrographia* c. művének kiadása 1665-ben. E műben kerültek először a nyilvánosság elé az akkoriban megalkotott mikroszkóp által feltárt kicsiny élőlények bonyolult ábrái. Hooke könyve sokban hozzájárult azon népszerű XVI. századi nézet kiszorításához, mely szerint az „atomok" az emberi megismerés határain túli fantazmagóriák – e nézetet kitűnően szemlélteti Shakespeare *Ahogy tetszik* c. darabjának egyik részlete: „Könnyebb az atomokat megszámlálni, mint követni egy szerelmes ember eszejárását..." (Ford. Szabó Lőrinc). Két évvel Hooke művének megjelenése után Robert Boyle kiadta *A szkeptikus kémikus* c. nagyhatású munkáját, mely a modern kémia kialakulásának kezdetét jelzi. Boyle úgy érvelt, hogy csak az atomista eszmékre támaszkodva lehet a kémiában visszaszorítani az alkimisták okkult, teleologikus befolyását. Ettől kezdve a vegyületeknek meghatározott, dinamikus törvényszerűségek szerint kellett vegyi folyamatokba lépniük, nem pedig különös vonzódások vagy ráolvasások hatására: a szónoklást végre kihessegették a laboratóriumokból. Ezt a megközelítést csak a XVIII. század vége felé tették teljessé, amikor Antoine Lavoisier végre

*Az atomizmus tradicionális görög formáját mindaddig nem lehetett a természet nyilvánvaló ésszerűségének racionális magyarázataként feléleszteni, amíg a véletlenszerűség és káosz ezen elméletben rejlő fogalmait megfelelően meg nem zabolázták. Ez akkor vált lehetségessé, amikor az Isten által elrendelt, anyagon kívüli törvények eszméje teljesen kiszorította az anyagon belüli lehetőségek és természetes törekvések arisztotelészi elképzelését. Csak ezután hagyatkozhattak a „kozmikus törvényalkotóra", aki az atomok látszólag véletlenszerű mozgását irányítja a rend létrehozása érdekében. E kerülő út alkalmazásával az atomista felfogásból a hagyományos ateista asszociációkat ki tudták küszöbölni, így az készen állt arra, hogy a mechanisztikus világkép hívei felkarolják.

Gassendi francia pap Isten fogalmát kifejezetten az atomok mozgatójaként vezette be, míg Walter Charleton, Gassendi befolyásos angol népszerűsítője megfordította a dolgok logikáját, hogy Isten létezését levezethesse abból a tényből: az atomok viselkedése valóban rendezett jelenségeket eredményez. Az általa közzétett új atomista felfogás Newtont is befolyásolta a Cambridge-ben töltött korai évek során; feljegyzései arról tanúskodnak, hogy tanulmányozta Charleton atomista elképzeléseit.

megszabadította a kémiát a flogiszton fogalmától. A flogisztont valóban létező anyagnak tekintették, és egyik anyagból a másikba vándorlásának segítségével magyarázták meg a kémiai változásokat, a legkisebb részecskék fogalmának bármiféle alkalmazása nélkül. A fizikában Huygens a természeti jelenségeket a mikroszkopikus atomok helyzetének és sebességének megváltozása alapján próbálta megmagyarázni (mely atomok viselkedését csak az energia és impulzus megmaradásának törvényei korlátozzák). Fontos a különbség: míg a korábbi atomisták az atomok saját, egyetemes belső tulajdonságaiban keresték az anyag és mozgás szabályszerűségeinek magyarázatát, addig Huygens a megmaradási törvények létezésében, melyeknek az atomok engedelmeskednek.

Newton a vékony szappanfilmek vastagságának meghatározása alapján a legkisebb természetes objektumok méretének határát a centiméter százezred részére becsülte. Nem törődött azzal a korábbi előítélettel, mely szerint az atomokban hinni valamilyen módon istentelen dolog, és azt a deista látomást hangsúlyozta, hogy a világ Isten által teremtett és mozgásba hozott atomokból áll. *Optika* c. munkájában így írja le megsejtéseit:

> ...valószínűnek tartom, hogy Isten a dolgok kezdetén az anyagot tömör, szilárd, kemény, áthatolhatatlan és mozgékony részecskék formájában teremtette, olyan nagyságban és alakban, olyan tulajdonságokkal és olyan térbeli viszonyokkal, amelyek megfelelnek annak a végcélnak, amelyre alkotta őket, hogy továbbá ezek a primitív részecskék szilárdak és összehasonlíthatatlanul keményebbek, mint bármely általuk alkotott porózus test, sőt olyan kemények, hogy sohasem nyűvődnek el vagy törnek össze, mert semmiféle megszokott hatalom nem lenne képes szétdarabolni azt, amit Isten maga a teremtésnél mint egészet alkotott...
>
> (Ford. Simonyi Károly)

Newton azt tartotta, hogy az anyagnak ezeket a szilárd, alapvető egységeit „nagyon erős vonzások" tartják össze. Ezeknek az erős vonzásoknak, valamint az elemi részecskék általuk vezényelt világának módszeres feltárása a XX. századi fizika kimagasló sikere.

Leibniz véleménye óhatatlanul eltért Newtonétól az atomista felfogást illetően. A 2. fejezetben már bepillantást nyerhettünk abba, milyen fontosnak vélte Leibniz a természet *folytonosságát*. Éppen ezért felháborítónak tartotta az atomok véges méretéből következő diszkontinuitás fontolgatását, hiszen az atomok sebességének, ha azok valóban a mikroszkopikus mozgások alapját alkotják, szintén nem folytonosnak kell lennie az atomi ütközések pillanatában. Ennélfogva Leibniz fenntartotta nézetét, mely szerint az anyag végtelenül osztható, és a világegyetem végtelenül kiterjedt, teljessé téve így a természet

végtelen kicsinytől végtelen nagyig terjedő, folyamatos spektrumát. Ugyan nem tagadta, hogy lehetnek bizonyítékok az anyag igen kicsiny darabjainak létezésére, de hitt abban, hogy mindegyikükről kiderül: „végtelen számú különböző dologgal teli világot" foglal magában. Azt az elképzelést, hogy az atomok léte az anyag oszthatóságának végét jelzi, romlott, rosszra csábító nézetnek tekintette:

> Az atomok képzeletünk erőtlenségének termékei, mely szeret megpihenni, s ezért elhamarkodja a következtetések levonását az osztályozásban és az analízisben; a természetben, mely a végtelenből indul és a végtelenbe tart, ez nem így van. Az atomok csak a képzeletet elégítik ki, de megbotránkoztatják a magasabb értelmet.

Míg Arisztotelész követői elvből ellenezték a végtelen nagy és végtelen kicsiny mennyiségek létezésének feltételezését, Leibniz szívesen elfogadta őket, és valójában úgy gondolta, hogy a természetben mindenütt megtalálhatók a Teremtő végtelen tökéletességének bizonyítékaként.

Jóllehet számunkra megszokott az atomoknak mint az anyag építőköveinek fogalma, ezt az elképzelést még a korai XX. század tudósainak sem volt könnyű elfogadniuk. A XIX. század kezdetén úttörő vegyészek, mint John Dalton, Amedeo Avogadro és Stanislao Cannizzaro hatékonyan használták fel az atomok eszméjét. Dalton 1766-ban született, tudományos pályafutásának legnagyobb részét Manchesterben töltötte. Első tudományos munkájában – a színvakságot fedezte fel (amelyben ő maga is szenvedett) – abból indult ki, hogy nem úgy látta a színeket, ahogyan mások (Franciaországban a színvakságot még ma is így nevezik: *le Daltonisme*). A látással kapcsolatos sikeres munkája után érdeklődése a meteorológia felé fordult. Még arra is szakított időt, hogy *Az angol nyelvtan elemei* c. munkát kiadja, mielőtt kíváncsiságát felkeltette egy, a gázok kémiájával foglalkozó nyilvános előadás és bemutató. Kémiai tevékenysége mély elkötelezettséget mutatott az atomizmus iránt, és Newton, valamint a görög atomisták tanulmányozása ösztökélte. Két maradandó újítása volt a kémia tanulmányozásában. Ő vezette be az összetett atomok „Lego-szerű" modelljeinek építését színes fadarabok összekapcsolásával, és ő volt az első, aki a kémiai szimbólumok átfogó írásos rendszerét használta az atomok csoportosításainak törvényekbe foglalására. Atomelméletét 1808 és 1810 között mutatta be, elsősorban *A kémiai filozófia új rendszere* c. fontos munkájában, melyben kifejtette, hogy minden anyag meghatározott méretű, oszthatatlan atomokból áll. Ezek az atomok azonosak és változhatatlanok; a kémiai reakciók új csoportosításokba rendezhetik őket, de nem teremthetik vagy semmisíthetik meg. Elképzelése így egyszerű magyarázatot adott a tömeg

megmaradására a kémiai reakciókban; ezt az elvet korábban Lavoisier javasolta és igazolta. Zajos sikert aratott azzal is, hogy a kémiai reakciókra vonatkozóan lefektette a többszörös súlyviszonyok törvényét. Dalton munkájának jelentősége elsősorban abban rejlik, hogy feltételezte: az atomoknak jól meghatározott tulajdonságaik vannak, melyeket a kémiai reakciók lefolyásának megfigyelése alapján állapított meg, nem pedig egyik vagy másik filozófiai hagyomány iránti vonzódása eredményeképpen. Elmélete a megfigyelt tényekre támaszkodott, bár az atomista hagyomány elkerülhetetlen hatása miatt nem teljes mértékben. Dalton megkülönböztette az atomokat az „összetett atomoktól", mely utóbbiakat ma molekuláknak nevezzük.

A molekula a kémiai vegyületek legkisebb létező mennyisége. Egy vízmolekulát elbonthatunk hidrogén- és oxigénatomokra, de eközben elvesztené víz mivoltát. Dalton ugyanakkor hitt abban, hogy az oxigén- és hidrogénatomok oszthatatlanok. A század végére J. J. Thomson kimutatja majd, hogy az atomok szintén feloszthatók kisebb részekre. Dalton úgy vélte, hogy az atomok és molekulák egymással szoros, mozdulatlan kapcsolatban állnak. Ezt a nézetet vitatta olasz kortársa, Amedeo Avogadro, aki azt tartotta, hogy a molekulákat méretüknél sokkal nagyobb távolságok választják el egymástól – olyan nézet ez, mely emlékeztet az ókoriak elképzelésére az űrben lévő atomokról.

Mint korábban láttuk, a termodinamikával foglalkozó korai kutatók, mint Maxwell és Boltzmann, hallgatólagosan elfogadták az atomok eszméjét, amikor a gázokat úgy kezelték, mintha mikroszkopikus tömegek mechanikai rendszerei lennének. Maxwell, aki előszeretettel foglalta tudományos nézeteit féligmeddig komoly versekbe, így magyarázta az ilyen elképzelésekhez vezető történelmi utat:

> Midőn felderengett a tudomány hajnala,
> a dolgokat intézte papok hada,
> Kalapácsot meg vésőt jól forgattak,
> s az ember képére isteneket faragtak;
> Majd színre léptek a kufárok,
> őket követték a kiváló, tudós tanárok,
> Kik démont s istent egyaránt döntöttek porba,
> felcserélve őket, időtlen időkig, atomokra.

Még a Faradayhez hasonló pragmatistákat is vonzotta az anyag kis részecskéinek gondolata, holott aggasztotta őket, hogy ez talán nem több, mint heurisztikus elv. Maxwell igen fontosnak tartotta a „molekulák" eszméjét (e névvel azt jelölte, amit ma atomoknak neveznénk). Pontos becsléseket

végzett lehetséges legnagyobb méretükre, egyetemesnek és változhatatlannak tekintette őket, valamint a természet teremtésébe vetett hite létfontosságú elemeinek, és annak tanújelét látta bennük, hogy a darwini evolúció érvényessége korlátozott. Az atomok spektroszkópiai tulajdonságai alapján Maxwell és az atomista elképzelések más, hozzá hasonló gondolkodású képviselői azt várták, hogy az atomoknak valamilyen belső szerkezetük lesz, így mindegyik fajta atom másként fog reagálni a zavaró hatásokra – olyan elképzelés ez, mely szintén emlékeztet az ókoriak elgondolásaira.

Mindazonáltal az empiricista és pozitivista filozófiák erős befolyása a XIX. század végén magával ragadta a kiemelkedő tudósok egy tekintélyes csoportját, köztük Machot, Ostwaldot és Duhemet, akik az atomista elképzeléseket filozófiai okokból ellenezték. Az atomok létezésének közvetlen megfigyeléseken alapuló bizonyítékának hiányában az egész teória bevezetését elméleti fogásnak tartották, melynek nincs helye egy kizárólag a megfigyelt tényeken alapuló természetfilozófiában. Duhem számára ez az instrumentalista doktrína kulcsszerepet játszott vallásos és tudományos nézetei békés együttélésének fenntartásában. Úgy érvelvén, hogy a természet összes „törvénye" csupán a megfigyelt tények hasznos, „látszatot fenntartó" leírása, azt állíthatta, hogy az igazi valóságot csak a megfigyelhetetlen dolgokba vetett katolikus hit fogja fel. Wilhelm Ostwald pedig szerét ejtette annak, hogy egész kémiakönyvet írjon, amely hangsúlyozottan kerülte az atomok fogalmának még az említését is, jóllehet ez a fogalom addigra már alapvető jelentőségűvé vált ezen a szakterületen. Igen tanulságos egyik kijelentése, melyet 1895-ben tett antiatomista filozófiáját ismertető előadásában, mert megmutatja ellenkezését bármely elmélettel szemben, mely az érzékszervek számára közvetlenül nem észlelhető létezőket tételez fel:

> Ne készíts magadnak faragott képet semmiről! Feladatunk nem az, hogy a világot egy többé-kevésbé homályos tükörben lássuk, hanem az, hogy olyan közvetlenül észleljük, amennyire csak ezt saját lényünk felépítése megengedi. A tudomány feladata az, hogy a realitásokat, a kimutatható és mérhető mennyiségeket egymással meghatározott összefüggésbe hozza... ezt nem végezheti el egy elméleti modell alkalmazásával, hanem kizárólag a mérhető mennyiségek kölcsönös összefüggései szolgáltatta bizonyítékok alapján.

Ostwald a termodinamikát és a fizikai kémiát a természet „energetikán" alapuló összetett megközelítésévé fejlesztette. Az energiát tekintette az egyedüli fizikai valóságnak (még házát is „Energiá"-nak nevezte el), az anyagot csupán az energiából eredő másodlagos dolognak tartotta. Ellenzett bármiféle mecha-

nikai magyarázatot, és elvetette a gázok Maxwell és Boltzmann által kidolgozott kinetikus elméletét. Végül is elképzeléseit nyilvánvalóan megdöntötte az a tény, hogy Planck kimutatta: a termodinamika II. főtételét csupán az energia fogalmának alkalmazásával nem lehet megmagyarázni.

Az atomelmélet e szívós ellenzői még 1906-ban is fenntartották, hogy az atom fogalma nem több, mint a tényeket képviselő szimbólum. Nem voltak hajlandók valóságot tulajdonítani semminek, amit előzőleg nem észleltek. Később, amikor már közvetlen megfigyelésen alapuló bizonyítékok álltak rendelkezésre az atomok létezéséről, többnyire áttértek az atomista nézetekre – kivéve Ernst Machot, aki soha nem fogadta el az atomista felfogást. Megtartotta instrumentalista véleményét az atomista felfogásról, mert szilárdan hitte, hogy a sikeres elméletek csupáncsak a tényekkel való egyezésben versengő elképzelések közül a legjobbak. Mach, Ostwaldhoz hasonlóan, tagadta a mechanikai magyarázatok elsődlegességét. Úgy érvelt, hogy a mechanikai modellek és magyarázatok uralkodó szerepe a tudományban inkább történelmi véletlen volt, mintsem egy érett természetfilozófia szükségszerű előfeltétele. A valóság machi elképzelése, mely az addig nem észlelt, illetve megfigyelhetetlen fogalmak iránti ellenkezését alátámasztotta, azon a felfogáson alapult, hogy csak érzeteink valóságosak. Ezt a „szenzualizmust" erősen ellenezték a meggyőződéses atomisták, mint például Boltzmann, aki azt tartotta, hogy a gázok és általában a kémiai folyamatok dinamikáját „energetikai" alapon magyarázó, a szenzualisták által előnyben részesített elképzelés éppen úgy megfigyelhetetlen dolgokon alapul. Hiszen az energiának a termodinamika és a differenciálegyenletek által megszabott áramlására hivatkozik – s ezek mind olyan elképzelések, melyeknek vannak megfigyelhetetlen oldalai –, és elvont képzetek sokaságát használja. A szenzualisták azt állították, hogy csak azt hiszik el, amit észlelnek, de valójában inkább hittek, mintsem láttak. Ha ugyanis valaki azért nem hisz az atomokban, mert nincs közvetlen látható bizonyítéka, akkor miért hinné azt, hogy a csillagok hatalmas asztronómiai objektumok? Csak az érzékelést figyelembe véve a csillagok tűhegynyi fénypontok, körülbelül olyan méretűek, mint az apró anyagi tárgyak; ám sem Mach, sem bárki más nem gondolná azt, hogy „valóban" ugyanolyan nagyok, mint a szentjánosbogarak vagy egyéb közeli fényforrások, melyekkel *látszólag* azonos méretűek. Így tehát, amikor a csillagokat látszólagos kis méretük ellenére oly roppant távolságban lévőnek képzeljük, akkor az érzékek számára rendelkezésre álló tapasztalat kiegészítésére további meggondolásokkal élünk. Semmiféle megfigyelés vagy az érzékszerveink által nyújtott egyéb adat sem kerülheti el, hogy a kontextus olyan elemei kapcsolódjanak hozzá, melyek a természetről alkotott egységes képbe beleillesztik őket – és nem lehetséges e képbe illeszteni

őket, ha a megfigyelt adatok gyűjtésében elkerülhetetlenül fellépő torzításokat elméletileg nem magyaráztuk meg, és nem vettük figyelembe. Pőre tények egyszerűen nem léteznek.

Láthatjuk, hogy a pozitivista dogmához való túlságosan lelkes ragaszkodás a fizikusok számára a XX. század elején feltehetően tetemes hátránnyá vált. Ez a gyanú ahhoz az érdekes feltételezéshez vezetett, hogy esetleg kapcsolat van a francia tudomány XX. század elején történt hirtelen lehanyatlása és az anyag atomi elképzelésével szembeni ellenállása között. Amint a tudomány figyelme a mikroszkopikus világ felé fordult, és ott olyan dolgokat talált, amelyeket nem lehetett szemléletessé tenni, felértékelődött a Maxwell-féle tudósok elméjének rugalmassága Duhem és Mach merev formalizmusával szemben.

A mai tudósok számára a fent ismertetett metafizikai viták különösnek tetszenek. Hozzászoktunk ahhoz, hogy a tudomány „tényei" szabják meg a természetfilozófia haladásának ütemét. A XIX. századi filozófusok azonban nem tartották helyzetüket ennyire másodlagosnak. A tudományról és a természetről való filozófiai okoskodásaikban nem a tudósok adatait és elméleteit tekintették kiindulópontnak, hogy eljussanak az alapvető metafizikai problémákhoz. Ezeket a problémákat már örökül kapták tradicionális formájukban, a kantiánusok, hegeliánusok és pozitivisták alapvető filozófiai beállítottságával egyetemben. Elsődlegesen annak alapján ítélték meg egy adott nézet alkalmasságát tudományos kérdések megoldására, hogy az mennyire volt sikeres emez alapvető filozófiai problémák feloldásában.

Az atom felboncolása

> Igaz, ma már tudjuk, hogy az atomok létezésével kapcsolatban oly sokszor kifejtett kétkedés eltúlzott volt, hiszen a kísérletezés művészetének csodálatos fejlődése lehetővé tette, hogy egyedi atomok hatását tanulmányozzuk.
>
> Niels Bohr

A XIX. század közepétől kezdve az atomista felfogású tudósokban kialakult az a meggyőződés, hogy az atomok és az elektromosság között szoros kapcsolat van. Ezt az összefüggést Faraday mutatta ki leghatásosabban. A közönséges sóról azt gondolták, hogy az a nátrium és klór elektromosan semleges kombinációja: egy negatív klóratom összetéve egy pozitív nátriumatommal semleges nátriumklorid molekulát alkot. Faraday kimutatta, hogy ha pozitív és negatív elektródákból zárt áramkört alakít ki, és azt sóoldatba meríti, akkor a pozitív

nátriumatomok a negatív elektródához, míg a negatív klóratomok a pozitív elektródához vonzódnak. Sőt, mindkét fajta atomnak az elektródáknál összegyűlt mennyisége egyenes arányban nőtt az elektromosság mennyiségének növelésével.

Az ilyen jelenségek azt jelzik, hogy az egyes atomoknak és molekuláknak, bár egyedileg elektromosan semlegesek, valamilyen módon képesnek kell lenniük arra, hogy elektromos töltést adjanak le vagy vegyenek fel. Ezeket az átmeneti jellegű atomokat, melyek valamilyen módon töltést vesztettek vagy vettek fel, *ion*nak nevezték (a görög „vándorolni" ige után). 1833-ra Faraday ezektől a megfigyelésektől eljutott ahhoz az elképzeléshez, hogy az atomizmus az elektromos töltésekre ugyanúgy érvényes, mint az anyag alkotóelemeire. Továbbá az alapvető elektromos töltések valamilyen módon az atomok részeinek, legalábbis azokhoz közel állónak látszottak.

Weber már korán, 1848-ban felvetette, hogy a fémek elektromos tulajdonságait esetleg meg lehet magyarázni a bennük lévő pozitív és negatív töltések mozgása révén, de csak jóval később, 1874-ben feltételezte George Johnson Stoney ír fizikus, hogy léteznie kell az elektromos töltés alapvető egységeinek, mert ez megmagyarázná Faraday kísérleteit. Két évtizeddel később azt javasolta, hogy ezt az alapvető egységet „elektronnak" nevezzék (a „borostyánt" jelentő görög szó betű szerinti átírása – a borostyánt gyakran használták elektrosztatikus kísérletekben, mert könnyen negatív töltésűvé vált, amikor szőrmével dörzsölték), és megjósolta a töltésegység számszerű értékét. Mindössze hat évvel később J. J. Thomson kísérletileg igazolta az elektron létezését Cambridge-ben. Thomson később megpróbálta az elektront „korpuszkulának" átkeresztelni, de végül is Stoney szóhasználata honosodott meg.

Történt néhány ötletes próbálkozás arra, hogy az elektron felfedezésére alapítva megalkossák az atom szerkezetének elképzelését. Ezek mind annak felismerését tanúsítják, hogy az atomok nem az anyag oszthatatlan, szerkezet nélküli darabjai, amint régen gondolták, hanem saját belső szerkezettel rendelkeznek. A Lenard által javasolt legkezdetlegesebb, korai elképzelés az atomot több ezer, azonos nagyságú pozitív és negatív töltést hordozó részecske együtteseként képzelte el, melyet az elektromos vonzások és taszítások tartanak egyensúlyban. Egy kevéssé ismert japán fizikus, Nagaoko feltételezte, hogy az atomban van egy pozitív központi töltés, melyet a Szaturnusz gyűrűihez hasonlóan negatív töltések vesznek körül, míg a legbefolyásosabb nézetet maga Thomson alkotta meg, aki azt gondolta, hogy az atom egy homogén pozitív töltésű szféra, benne elektronokkal, éppúgy, mint a mazsolák a pudingban. Még azt a lehetőséget is számba vette, hogy az elektronok esetleg stabil elrendeződésben maradhatnak, kör alakú pályákon mozogva, vagy egy

egyensúlyi helyzet körüli oda-vissza rezgés útján. 1910 körülre Manchesterben Ernest Rutherford és munkatársai már kivallattak atomokat nehezebb részecskékkel való bombázással. Megvizsgálva annak módját, ahogyan a beeső részecskéket az atomok eltérítették, le tudták vonni azt a következtetést, hogy az atomok tömegének legnagyobb része egy kicsiny, pozitív töltésű „magban" összpontosul, és körülötte megfelelő távolságokban oszlanak el a negatív töltésű elektronok. Később Rutherford azt vetette fel, hogy a magot „protonnak" nevezett, súlyos részecskék alkotják, melyek mindegyike az elektron töltésével azonos nagyságú, azzal ellentétes töltést hordoz, de tömege az elektronénak mintegy 1836-szorosa. A protonok hozzájuk hasonló tömegű, de elektromos töltést nem hordozó hipotetikus részecskékkel együtt alkotják a magot. Ezeket „neutronnak" javasolta elnevezni. 1932-ben, tizenkét évvel Rutherford előrejelzése után James Chadwick felfedezte a neutronokat.

Látványos fejlődés következett, kialakult az atom ma már szabványos képe: súlyos mag, legfeljebb 10^{-13} centiméter átmérővel, körülvéve 10^{-8} centiméter távolságig terjedő pályákon keringő elektronokkal, melyek pontos elrendezése meghatározza az adott atom kémiai tulajdonságait. Mikor ezt az elképzelést egyesítették Bohr energiakvantálási elvével, kivételesen pontos modell jött létre, mely képes volt az összes atomtípusok részletes tulajdonságait megjósolni. A kémia és fizika tárgya most már egyszerűen meghatározható volt. A vegyészeket az elektronok atomon belüli elrendezése érdekelte: az elrendezés részletei szabják meg, hogyan tudnak az atomok molekulákban és vegyületekben összekapcsolódni. A fizikusok figyelmüket az atommag szerkezetére és az azt alkotó részecskék tulajdonságaira összpontosították.

Az 1920-tól napjainkig terjedő időszakban az elemi részecskék fizikája elsődleges fontosságúvá vált. A fizikai tudományok mindmáig legalapvetőbb, legköltségesebb és legvonzóbb területe, amely manapság is vonzza a legtehetségesebb matematikai fizikusokat. A kísérletek már régen túlnőttek az egyes tudósok lehetőségein. Csak hatalmas nemzetközi együttműködésként valósíthatók meg, melyben tudósok, technikusok és számítógép-szakértők százai vesznek részt. Az ilyen vállalkozások vezetőinek egyszerre kell rendelkezniük a fizikus, a közgazdász, a politikus és a személyzetis képességeivel (egyesek szerint még a maffiafőnökével is!) ahhoz, hogy sikeresek legyenek. Carlo Rubbia, olasz Nobel-díjas tudós, akiről azt tartják, hogy mindezen tulajdonságokat egyesíti magában, odáig merészkedett, hogy a mai kísérleti részecskefizika eredményeit a reneszánsz teljesítményével hasonlítsa össze. Lehet, hogy a jövendő évszázadokban az anyagot alkotó elemi részecskék feltárását civilizációnk legnagyobb vívmányának fogják tekinteni, hatalmas gyorsítóinkat pedig az emberi szellem fenséges emlékoszlopainak és megszentelt katedrálisainak.

Szép új világ

> Világosan kifejtett tudományos világképek keletkezhetnek azoknak az alapvető nyelvtani szerkezeteknek a magasabb szintű specializációjával, melyek az előző gyermeteg, csak félig-meddig kifejtett nézeteket szülték. Így épül napjaink tudományos világképe az alapok magasabb szintű specializációja révén.
>
> Benjamin Lee Whorf

A XX. század kezdetén csak két természeti erőt ismertünk: a gravitációt, valamint az elektromosság és mágnesesség összefonódó hatását. Ezt a tudást most „klasszikus fizikának" nevezzük, hogy megkülönböztessük az azt követő kvantumforradalomtól. Akkoriban számos tudós úgy vélte, hogy a klasszikus fizika magában foglalja mindazt, amit csak a világról tudhatunk. Ez a túlzottan magabiztos elutasítás olyan nézet, amely mindannyiszor felmerül, valahányszor a tudósokra sikeres időszak köszöntött. Aggódnak, hogy annyira sikeresek voltak: a tudományterületet lezárhatják, a könyvet befejezhetik. 1880-ban a porosz szabadalmi hivatal igazgatója arra kérte kormányát, hogy osztályát zárja be, mert már nincs elképzelhető dolog, amit ki ne találtak volna! 1894-ben Albert Michelson, a kor egyik vezető fizikusa, a következőket állította:

> A fontosabb fizikai alaptörvényeket és tényeket már mind felfedezték, és azok olyan szilárdan megalapozottak, hogy új felfedezések általi megdöntésük lehetősége rendkívül valószínűtlen... Jövendő felfedezéseinket a tizedesvessző utáni hatodik helyi értékben kell keresnünk.

Az efféle kijelentések bizonyos mértékig csupán az akkori fizika szűklátókörűségét tanúsítják. Érvényességi körét fölöttébb korlátozottnak gondolták, és a kémiától meg az élettudományoktól meglehetősen elkülönültnek. Mindazonáltal a tudósok, miként Michelson is, nem voltak tudatában az akkori fizikát éktelenítő hatalmas réseknek. Keveset vagy semmit sem tudtak az anyagok tulajdonságairól, a fény természetéről vagy a csillagászati objektumok mibenlétéről. A fizikusok elképzelése, mely szerint a Napot a gravitációs összehúzódás hőenergiája táplálja, ellentmondott annak, hogy a Napnak elég hosszú ideig kellett léteznie ahhoz, hogy a darwini evolúció megtörténhessen. A forradalom csírái kezdtek kibújni a földből, de kevesen figyeltek fel rájuk. Tizenöt évvel Michelson kijelentése után jön majd Einstein és Bohr, a relativitással és a kvantumokkal feje tetejére állítva az egész világot.

Akkoriban még a világot az elektromosság, a gravitáció és a mágnesesség formálta, azóta kísérleteink két további alapvető erőt azonosítottak: az „erős",

más néven „nukleáris" kölcsönhatást, amely az atomok magját tartja össze, és a „gyenge" kölcsönhatást, amely a radioaktivitás bizonyos fajtáit hozza létre. Míg az a távolság, melyen belül az elektromos és gravitációs erők jelentős hatást fejtenek ki, korlátlan, addig az erős kölcsönhatás hatótávolsága a legkisebb atommag méretével, mintegy 10^{-13} centiméterrel azonos, a gyenge kölcsönhatás hatótávolsága pedig még ennél is százszor kisebb. E kölcsönhatások működésének részleteit nem lehet almákkal és mágnesekkel kideríteni, ehhez különleges körülményeket és környezetet kell létrehoznunk, melyek közepette a mikroszkopikus erőhatások kézjegye az érzékeny műszerek számára megmutatkozik. Megnyilvánulásaik azonban egyáltalán nincsenek rejtve előlünk. Közéjük tartozik az atombomba és a Nap.

Hamarosan felfedezték, hogy a protonok, neutronok és elektronok nincsenek egyedül. Az elemi részecskék klubja nem látszott szigorúan zártkörűnek. Új felfedezések folyamatos sora következett: 1936-ban a müon, 1947-ben a semleges π-mezon, 1950-ben a töltött π-mezon, és 1956-ban a sokáig keresett neutrinó, melynek létezését Pauli jósolta meg 1931-ben. Az ötvenes és hatvanas évek során az első olyan berendezések építése, melyek lehetővé tették protonok nagy sebességre gyorsítását és darabokra törését egymással való ütköztetés útján, népességrobbanást idézett elő az elemi részecskék körében. Idővel néhány száz ilyen részecskét találtak. Ami zártkörű klubként indult, végül mindenki bazárjává terebélyesedett.

Vérfertőző anyag?

Tudós könyvekben ez áll:
Bolhát kisebb bolha zabál,
E kisebbet űzi hasonló fátum,
S így megy ez ad infinitum.

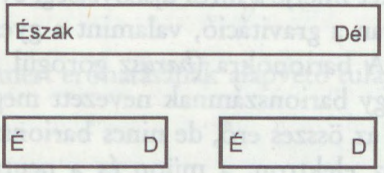
Jonathan Swift

A hatvanas években a mind magasabb és magasabb energiájú protonok ütközéseit túlélő törmeléken egy ideig két gyökeresen eltérő filozófia virágzott. Az első, az ókori atomisták sejtéseivel összhangban, fenntartotta azt a nézetet, hogy az anyagot protonokra, neutronokra és hozzájuk hasonló más részecskékre lehet osztani, ezek pedig kisszámú elemi alkotórészből állnak, melyek még tovább menve esetleg szintén kisebb részecskékből tevődnek össze. Előbb-utóbb megtaláljuk az oszthatóság „alapvonalát", és a *valódi* elemi részecskéket, amelyek száma véges, és amelyekből minden anyag összetétel

útján jön létre. A másik nézetnek, az előbbivel szöges ellentétben, semmi köze nem volt az atomista hagyományhoz. A keleti elképzeléshez tért vissza a természet összes elemének holisztikus kölcsönhatásáról, illetve Lebniz elfogultságához, melyet a természet végtelen oszthatósága és folytonossága iránt tanúsított. Azt tartotta, hogy az anyag végtelenül osztható, végtelen számú elemi részecskére, melyek mind jól meghatározott módon egymásból épülnek fel. Ez a vérfertőző rendszer „csizmahúzó-elmélet" néven vált ismertté, Münchausen báró tiszteletére, aki azt állította, hogy felemelte magát saját csizmahúzójánál fogva! A következőkben különbözik az első elképzeléstől: ha veszünk egy doboznyi anyagot, és felhevítjük, az első nézet szerint az anyag előbb vagy utóbb alapvető részecskéire bomlik, és ezek energiája egyre nő, amint a dobozt tovább melegítjük. A második nézet képviselői arra a következtetésre jutnak, hogy amint a dobozt melegítjük, úgy fordítódik az energia mind nagyobb és nagyobb tömegű elemi részecskék létrehozására (melyeknek végtelen sokasága lehetséges), és ez mind több és több energiát igényel, így a doboz hőmérséklete nem feltétlenül emelkedik tovább. A korai csizmahúzó-elmélet egyik feltűnő következménye az volt, hogy léteznie kell egy körülbelül egytrillió fokos maximális lehetséges hőmérsékletnek. Ma már tudjuk, hogy ez a fajta elmélet a tényekkel ellentmondásban van, és az általa feltételezett maximális hőmérsékletnél sokkal magasabbakat lehet részecskegyorsítókban elérni. Még mindig lehetséges azonban, hogy az anyagnak valóban van „csizmahúzó" szerkezete az eddig vizsgáltnál mélyebben fekvő mikroszkopikus szinteken, sokszorosan magasabb maximális hőmérséklet mellett.

A „minden valami másból áll" gondolatnak már a puszta mérlegelése is misztikus eltévelyedésnek látszik, de összhangban van azzal, amit a részecskefizikai kísérletek mutattak. A protonok ütközéseiről kiderült, hogy még több protont hoznak létre, nem pedig a protonok alkotóelemeinek gyűjteményét. Feltéve, hogy három elemi részecske létezik – „Tom", „Dick" és „Harry" –, az észlelt események összhangba hozhatók egy olyan felszínes „csizmahúzó"-elképzeléssel, hogy „Tom" „Dick"-ből és „Harry"-ból áll össze, „Dick" „Tom"-ból és „Harry"-ból, míg „Harry" „Dick"-ből és „Tom"-ból. Egy efféle dilemma elkerülhetetlennek látszik, amint meggondoljuk, minek kell történnie, amikor megpróbáljuk a protont és neutront részekre hasítani. Ezeket a részeket szükségszerűen az erős kölcsönhatás tartja össze, mely olyan erős, hogy a felszakításakor felszabaduló energia, Einstein híres $E=mc^2$ tömeg-energia egyenértékűségi elvével összhangban, elegendő új részecskék létrehozására. Az elemi részecskék fogalma ilyen körülmények között némiképp ködössé válik. Ahhoz hasonlíthatjuk ezt, amikor egy mágnesrudat mágneses monopólusokra próbálunk szétválasztani úgy, hogy középen elvág-

juk. Ahelyett, hogy északi és déli polaritású mágneses monopólusokat készítenénk, két mágnesrudat kapunk (4.1 ábra), s mindkettőnek két mágneses pólusa van. Bizonyos értelemben a mágnesek más mágnesekből épülnek fel.



4.1 ábra. Egy mágnes eltörése két új mágnest hoz létre, nem pedig két mágneses monopólust

A „csizmahúzó"-elképzelés lassanként eltűnt, amint a protonok és neutronok igen pontosan meghatározott belső szerkezetére utaló bizonyítékokat találtunk.

Kvarkok

Három sirály-kvarkot néked Márk úrfi!
Biztos nincs sok vakkantó fakérge néki,
S ha volna mégis, a célt mind-mind elvéti.
De ó, ökörsasszemű Mindenható, nem volna-é
pacsirta micsoda, égi,
Azt látni, hogy az a vén héja mint
rivallg a sötétben a kicsi
Nyekre, s mint vadászik a Palmerston parki
pöttyös nadrágú pöttömökri.

James Joyce

A hatvanas években az elméleti fizikusok kezdték megérteni az elemiségre igényt tartó részecskéket. Murray Gell-Mann és George Zweig kimutatta, hogy egy csodálatosan egyszerű elképzelés meg tudja magyarázni az összes elemi részecskét. Azt vetették fel, hogy az olyan részecskék, mint a proton, neutron és az összes mezon, melyekre mind hat az erős kölcsönhatás, egyáltalán nem elemi részecskék, hanem alkotóelemeik vannak. Gell-Mann „kvarknak" nevezte őket, míg Zweig „ásznak". Gell-Mann irodalmi utalása James Joyce „három ...kvarkot néked Márk úrfi" mondatára volt az, amelyik meghonosodott. (Joyce *Finnegan ébredése* c. művében a három kvark látszólag nem más,

mint Finn úr gyermekei. Egyes helyzetekben Finn urat saját maga képviseli, más esetekben ezt a szerepet három ifjú gyermeke játssza.)

A szubatomi részecskéket három csoportba oszthatjuk: barionok, mezonok és leptonok. A leptonokra (*lepton* görögül „könnyűt" vagy „kicsit" jelent – ez volt az özvegyasszony két fillérje a híres újszövetségi evangéliumi történetben: Mk 12,42-43) hatással van a gravitáció, valamint a gyenge kölcsönhatás és az elektromágneses erők. A barionokra (*barüsz* görögül „nehéz") az összes erő hat, és jellemző rájuk egy barionszámnak nevezett megmaradó mennyiség. A mezonokra szintén hat az összes erő, de nincs barionszámuk. A protonok és neutronok barionok, az elektron, a müon és a neutrinó leptonok, míg az összes pion mezon. Felfedezése után egy ideig a müont μ-mezonnak hívták, mert tévesen azt hitték, hogy a mezonok csoportjába tartozik.

Az utóbbi években folyamatosan gyűltek a bizonyítékok, melyek megerősítik Zweig és Gell-Mann elképzelését, mely szerint a protonok és neutronok nem elemi részecskék. Szóródási kísérletekben úgy viselkednek, mintha három mikroszkopikus részből állnának, melyek a protonok és neutronok bombázásakor létrejövő szóródási mintázat révén mutatkoznak meg. Senki sem látott azonban soha egyet sem e kvarkok közül, melyekből minden anyag felépül. Vajon miért nem?

A kvarkok kétféle típusú töltést hordoznak. Az elektronok és protonok közönséges töltése mellett van egy másikfajta töltésük is, melyet „színnek" neveznek – bár ennek egyáltalán semmi köze sincs a dolgok színárnyalatához. Úgy látszik, hogy az elektromos töltéshez hasonlóan ez a szín a természetben megmarad. Vagyis, amikor a részecskék kölcsönhatásba lépnek és ütközésekben átalakulnak, a színtöltést át lehet rendezni, de teljes mennyisége a végelszámolásnál nem változhat. Nos, ugyanúgy, ahogyan az elektromos töltéssel rendelkező részecskék vonzzák vagy taszítják egymást, a színnel rendelkező részecskék is erőt gyakorolnak egymásra. Ez a nukleonokat alkotó kvarkok között ható „színerő" az eredete a nukleonok között fellépő erős kölcsönhatásnak, éppen úgy, ahogy a protonok és elektronok között fellépő elektromágneses erők hozzák létre a molekulák és vegyületek között fellépő másodlagos kémiai erőket. Az atomenergia az a folyamat, melynek révén energiát nyerünk a kvarkok közötti „színerőből". Ugyanolyan valóságos, mint ön vagy én. Mégis, a „színerő" kifejezetten furcsa dolog. Míg a gravitációs, elektromos és mágneses erőhatások a részecskék közti távolság négyzetével fordított arányban csökkennek, addig a „színerő" a kvarkok távolságának emelkedésével növekszik. Olyan, mint a rugalmas erő, és fogva tartja a kvarkokat a barionok és mezonok belsejében.

Kvantumterek

A természet törvényei bizonyos létezőknek meghatározó szerepet adnak. Nem vagyunk teljesen bizonyosak abban, melyek ezek a létezők, de mai tudásunk szerint az elemi kvantumterek.

Steven Weinberg

A természet négy ismert erőhatásának alapvető tulajdonságait a 4.1 táblázatban soroljuk fel.

4.1 táblázat. A természet négy alapvető erőhatása

Erő	Hatótávolság	Relatív erősség	Hatás	Közvetítő részecske
gravitáció		10^{-39}	mindenre	graviton
elektromágneses erők		10^{-2}	elektromos töltésekre	foton
gyenge kölcsönhatás	10^{-15} cm	10^{-5}	leptonokra, hadronokra	W^+, W^-, Z bozonok
erős kölcsönhatás (színerő)	10^{-13} cm	1	szín töltésű részecskékre	gluonok

Kiderült, hogy az összes fenti erőt a Faraday által bevezetett klasszikus „erőtér" és a természet kvantumbizonytalansága egyesítésével kapott fogalommal tudjuk legjobban leírni. Az egyesítés eredménye a *kvantumtér*. Emlékszünk, hogy Faraday klasszikus erőtere meghatározatlan „valami" volt, amely betöltötte a teret, és számokkal leírható tulajdonságai voltak. Ezek a számok az erőtér nagyságát és irányát adják meg a tér bármely pontjában. Az elektromos, mágneses és gravitációs erőterek ennek klasszikus példái. Ha Lord Kelvin módjára szemléletes képet is megkövetelünk, akkor bizonyos erőterekre találó hasonlat az egész teret betöltő, áramló folyadék. Minden egyes erőteret más és más folyadéknak tekinthetünk. Heisenberg határozatlansági elvével összhangban a kvantumterekben megnyilvánul a méréseink által megjelent bizonytalanság. A kvantumtereket úgy tekinthetjük, mint folyadékok örvénylő áramlását, melyekben a kaotikus mozgások mind erősebbé válnak, amint a folyadékot egyre erősebb nagyítással vizsgáljuk. Ugyanakkor

nagyobb léptékben szemlélve a mikroszkopikus turbulenciák kiegyenlítődnek, és viszonylag sima áramlást eredményeznek, ahogyan az óceán felszíne is egyenletesnek látszik nagyobb távolságból. A kvantumtérelméletek az erőterek átlagos tulajdonságainak matematikai leírásai véges nagyságú tér- és időintervallumokban. Megjósolják, hogyan változnak ezek a terek, és hogyan lépnek egymással kölcsönhatásba. Míg a klasszikus skalárteret a tér összes pontjában mutatott erősségével határozzuk meg, a kvantumtereket valószínűségek megadásával, melyek megmondják, hogy milyen valószínűséggel észlelünk adott térerősséget meghatározott időben a tér bizonyos pontján. A természet elemi alkotórészeire vonatkozó összes sikeres elméletünk kvantumtérelmélet.

A kvantumtérelméletek gyökeresen különböznek klasszikus elődeiktől. E különbség legfontosabb megnyilvánulása a vákuumról nyújtott képben jelenik meg. A természet kvantum előtti búvára számára semmi sem lehetett egyszerűbb, mint a vákuum – a vákuum a semmi, a maga egyszerűségében és tisztaságában. A világ kvantumszemlélete azonban megtiltja azt a fajta szabatos tudást, melynek alapján azt mondhatjuk, hogy egy doboz olyan pontosan meghatározott valamit tartalmaz, mint a „semmi". A mérés sugárzással jár. Az elektromágneses sugárzást mindenhol megtaláljuk. A kvantumvákuum tele van aktivitással. Csak az tünteti ki, hogy a lehető legalacsonyabb energiaszintű állapot, amelyben rendszer létezhet.

A kvantumvákuumot ellentétesen töltött, folyamatosan megjelenő és eltűnő részecskepárok tengereként képzeljük el (4.2 ábra). Ezek a párok a Heisenberg-féle határozatlansági elv alapján megfigyelhetetlenek, ha energiatartalmuk ΔE, és Δt ideig léteznek úgy, hogy a

$$\Delta E \Delta t < h/4\pi$$

egyenlőtlenség teljesül. E részecskepárokat „virtuális" részecskéknek nevezzük. Bár egyedileg nem észlelhetők, együttes hatásuk azonban kicsiny, de mérhető változásokat okoz az atomok energiaszintjében. Később látni fogjuk, hogy az aktív kvantumvákuum létezésének fontos következményei vannak a világ szerkezetét illetően.

A virtuális részecskék elképzelése megszabja azt is, hogyan képzeljük el a természet erőinek hatását. Míg Newton olyan modellt kényszerült választani, melyben az erők ismeretlen módon, pillanatszerűen, nagy távolságokon át hatnak, a kvantumszemlélet azt kívánja meg, hogy az erőhatások „közvetítő" részecskék cseréjén keresztül érvényesüljenek. Az elektromosan töltött részecskék elektromágneses kölcsönhatásának esetében a közvetítő részecske a fény fotonja; a kvarkok közti erős kölcsönhatást a gluonoknak nevezett részecskék

közvetítik, míg a gyenge kölcsönhatást W és Z bozonok, melyeket nemrégiben fedeztek fel Genfben a CERN laboratóriumában nagy energiájú részecskenyalábok ütköztetése során. Legvégül, a gravitáció közvetítő részecskéjét gravitonnak nevezzük. Heisenberg határozatlansági elve megadja az összefüggést a részecske tömege és az általa közvetített erő hatótávolsága között.



4.2 ábra. A kvantumvákuum: ez a téridődiagram egy részecske–antirészecske pár spontán keletkezését mutatja. A részecskepár később megsemmisül, a keletkezésükhöz szükséges tömeg–energia mennyiséghez képest olyan rövid időn belül, hogy a Heisenberg-féle határozatlansági elv korlátai miatt a folyamat megfigyelhetetlen. Az ilyen megfigyelhetetlen folyamatokat virtuális folyamatoknak nevezzük. Bizonyos körülmények között a megsemmisülést meg lehet akadályozni külső erőtér alkalmazásával, amikor is a részecskék észlelhetővé válnak. A kvantumvákuumot úgy képzeljük el, hogy virtuális folyamatok végtelen tengerét tartalmazza. Mindazonáltal ez az elképzelés kísérletileg közvetlenül ellenőrizhető

A hatótávolság hozzávetőleg a közvetítő részecske De Broglie-féle hullámhosszával egyenlő, s ezért fordítottan arányos a részecske tömegével. Így tehát a tömeggel nem rendelkező fotonok és gravitonok a végtelen távolságokban ható elektromágneses és gravitációs erőket közvetítik. Az erős és gyenge kölcsönhatások rendkívül kis hatótávolsága közvetítő részecskéik roppant nagy tömegét tükrözi.

A belső tér alaptörvényei

> Hajlok arra a gondolatra, hogy tudományos felfedezést tenni lehetetlen olyan eszmékbe vetett hit nélkül, melyek teljes mértékben spekulatívak, és néha meglehetősen ködösek; olyan hit nélkül tehát, amely tudományos szempontból teljesen megalapozatlan.
>
> Karl R. Popper

A fizikusok matematikai törvényeket alkottak, melyek leírják, hogyan viselkednek a természet erői mikroszkopikus szinten. Mindegyik elmélet ellentmondásmentes, hasznos az elemi részecskefizika gyakorlatában, és bármiféle gyakorlati szempont szerint megítélve „sikeres", a részecskefizikusok azonban egyáltalán nem elégedettek. Számos megválaszolatlan kérdés maradt még, melyek a természet törvényeit illető mai előítéleteket és várakozásokat szemléltetik:

a) Léteznek-e olyan egyszerű elvek, melyek megszabják, hogy a természetben milyen erők és részecskék léteznek, és hogy ezek miképpen hatnak egymásra?

b) Létezik-e a természet egyesített törvénye, a „minden létező elmélete"?

c) A természet erőhatásai miért éppen olyan erősségűek, amilyennek észleljük őket?

d) Mi az anyag végső alkotórésze – a legelemibb az elemi részecskék között?

e) Melyek azok a végső elvek, amelyeket a természet törvényeinek felismerésében alkalmaznunk kell?

Az a tény, hogy ilyen kérdéseket teszünk fel, bizonyítja a természet egyszerűségébe és egységébe vetett hitünket. A fizikusok hisznek abban, hogy a természet felépítésében eddig felfedezett ésszerűség erős bizonyíték egy mindent felölelő, mélyebb ésszerűségre, mely a természet legalapvetőbb létezőit irányítja. De megmarad az égető kérdés: melyek ezek az alapvető létezők? Mit irányítanak a természet törvényei?

A tudományos törvények fejlődésének eddig megfigyelt esetei, akár newtoni, akár relativisztikus vagy kvantumos jellegűek, egy szükségszerű közös vonást mutattak. Szabályokat kerestünk, melyek megadják, hogyan viselkednek a fizikai jelenségek a jövőben, ha itt és most meg tudjuk adni állapotukat.

E megközelítés kiterjesztése az elemi részecskék világára látszólag az anyag legkisebb részeinek viselkedését leíró matematikai szabályokat kívánna meg. De ez csak az igazság egyik fele. Az elemi részecskéket tanulmányozó fizika valami egészen különös dolgot kíván tenni, ami a fizika egyéb területeinek nem célja. Azt akarja elérni, hogy az elemi részecskék viselkedését szabályozó törvények szabják meg, milyen részecskék létezhetnek. A newtoni mechanika tudósát nem érdekli a természetben található összes olyan objektum összeírása, melyekre a newtoni törvények hatnak. Megtanulta Galilei leckéjét, mely szerint a testek egyedi azonossága nem befolyásolja azt, hogy miképpen válaszolnak erők hatására. Továbbá minden általa megfigyelt makroszkopikus méretű test különböző. Ezzel ellentétben a részecskefizikus azt látja, hogy az elemi részecskék véges számú, *azonosfajta* részecskéket tartalmazó csoportba sorolhatók. Bárhova tekintünk a természetben, találunk elektronoknak nevezett létezőket, melyeket kisszámú tulajdonság, mint tömeg, elektromos töltés, perdület és így tovább, határoz meg. Az elektronok egymással teljesen azonosnak látszanak: „ha egyetlen elektront láttál, akkor már mindet láttad." Ez a legmeggyőzőbb a „természet egységének" bizonyítékai közül (egykor John Wheeler és Richard Feynmann annyira e tény hatása alá került, hogy mindketten feltételezték, hogy csak *egyetlen* elektron létezik, mely az időben végtelen sokszor előre és hátra mozogva azt a látszatot kelti, mintha nagyon sok egymással azonos elektron létezne!).

Ha elfogadjuk, hogy az anyag legalapvetőbb alkotórészei *azonos* elemeket tartalmazó csoportokban léteznek, akkor ezután azt szeretnénk megtudni, hogy vannak-e a részecskék eltérő típusainak számát korlátozó törvények. Ezt bizonyos mértékig sikerült is felderíteni.

Az elemi részecskéket és kölcsönhatásaikat leíró mai elméletek a *gauge-elméletek* családjának tagjai. Az első ilyen elmélet Maxwell elektromágneses elmélete volt. A természet ismert erőinek – gravitáció, elektromágnesesség, erős és gyenge kölcsönhatások – leírására szolgáló legjobb elméleteink mind gauge-elméletek. Az efféle elméletek teljes egészében szimmetriákon alapulnak. A 3. fejezetből emlékszünk rá, hogy a mértani szimmetria jelenléte mindig kapcsolódik a tanulmányozott rendszer valamely tulajdonságának állandó voltához, illetve megmaradásához a változások során. Ez a tulajdonság akkor is fennáll, ha a vizsgált szimmetriák elvontabbak, mint az egyszerű geometriai eltolás vagy forgatás esetében. E további szimmetriákat *belső* szimmetriáknak nevezzük, melyek a részecskék identitásának különböző megváltoztatásával szembeni invarianciáknak felelnek meg – ilyen változtatás lehet például, ha felcseréljük a világegyetem összes protonjának és neutronjának identitását. A mértani szimmetriákhoz hasonlóan belső szimmetriák szintén megmaradási

törvényeket eredményeznek, így jön létre például az elektromos töltés megmaradásának törvénye.

A *gauge*-szimmetriák ettől meglehetősen különböznek. Nevezetesen nem hoznak létre a természetben megmaradó mennyiségeket, valamely gauge-szimmetria megmaradásának követelménye azonban, mondjuk az elektromágneses kölcsönhatások során, az adott jelenség részletes szerkezetére vonatkozó igen erős matematikai korlátozást jelent. Így például az a követelmény, hogy a Maxwell-egyenletek és kvantumos módosításaik gauge-szimmetrikusak legyenek, megtiltja a foton tömegének létezését, és pontosan megszabja, hogyan lépjen a fény kölcsönhatásba elektromosan töltött részecskékkel. Az ilyen meggondolások ereje azonban még ennél is mélyebbre hatol. A 3. fejezetben említett legegyszerűbb mértani szimmetriák mind a *globális* szimmetriák példái. Tegyük fel, hogy veszünk egy tárgyat, mondjuk az ön kezét, és helyzetét úgy változtatjuk meg, hogy minden pontja egyformán transzformálódjék. Az eredmény világos: a kéz pusztán a tér egy másik helyére mozdul el. A fizikusok azonban azt szeretnék, ha a természet törvényei ennél sokkal általánosabb jellegű változások során is változatlanok maradnának. Természetellenes dolog azt várni, hogy invariancia áll fenn mindenütt azonosnak feltételezett változásokkal szemben. Ha a világegyetem másik végén valamilyen változás történik, honnan tudják azonnal itt és most az elektromágneses jelenségek, hogy milyen módon viselkedjenek ahhoz, hogy a globális szimmetria megőrzése érdekében szinkronban maradjanak? A fénysebesség véges volta ezt látszólag megtiltja. Amire szükségünk van e nehézség elkerüléséhez, az a természeti törvény olyan változásokkal szembeni invarianciája, mely változások a tér különböző helyein eltérőek és tetszőlegesek lehetnek. Ezt *lokális* gauge-szimmetriának nevezzük. Míg a mértani és belső szimmetriák a mindenhol és mindig azonosan végbemenő változásokkal szembeni invarianciák, a lokális gauge-szimmetria azt követeli meg, hogy invariancia álljon fel különböző helyeken és időben végrehajtott eltérő változásokkal szemben. Első látásra ez lehetetlennek tetszik. Ha kezem minden egyes része eltérően, tetszőleges módon mozdulhat el a térben, akkor formája nem maradhat meg. Szét fog esni különálló darabokra, amelyek más-más irányokba mozdulnak el. Egyetlen mód van arra, hogy a kéz formája megmaradhasson e semmi által nem korlátozott változások során: létezniük kell olyan erőknek, melyek leszűkítik a kéz különböző részeinek mozgási lehetőségeit. Meglehetősen szellemtelenül képzelhetjük például azt, hogy ujjaink körül rugalmas szalag van szétválásuk megakadályozására. Ez azt jelenti, hogy egy általánosabb, másképpen *lokális* gauge-szimmetria bevezetése ténylegesen megszabja, hogy milyen erők létezhetnek az adott részecskék között. Einstein általános relativi-

táselmélete ilyenfajta lokális gauge-elmélet: az állandó, egyenletes sebességgel történő mozgás leírására megalkotott mozgástörvények szolgálnak a speciális relativitás elméletének alapjául. A törvények alakja minden állandó relatív sebességgel haladó megfigyelő számára azonos. Az egyedüli lehetőség arra, hogy a mozgástörvények alakja azonos legyen minden egymáshoz képest tetszőlegesen gyorsuló relatív mozgásban lévő megfigyelő számára – mely esetben a megfigyelők erőhatásokat éreznek – az, hogy ellentétes hatású gravitációs erőtér létezik.

Annak okát, hogy a részecskefizikusok miért lelkesednek a gauge-elméletek iránt, e figyelemreméltó tulajdonságaikban találhatjuk meg. Ha adott valamely szimmetria, az a természet egy vagy több kölcsönhatása teljes elméletének kialakítására oly módon használható fel, mely nagyon erősen korlátozza, hogy az elmélet érvényességi területén belül milyen részecskék létezhetnek, és közöttük milyen erőhatások léphetnek fel. A gauge-korszak a mikrovilág törvényeit rendszeresen és átfogóan szimmetriákra szűkítette. Míg a klasszikus fizika törvényeiről csak utólag ismertük fel, hogy bizonyos szimmetriák megmaradásával kapcsolatosak, a modern kvantumfizika törvényeit *ab initio* levezethetjük a szimmetriák általános voltába vetett hitünkből.

E meggondolások most először adnak a fizikusok kezébe megbízható iránytűt, melyre hagyatkozva a természeti törvényekre vonatkozó ismereteiket anélkül terjeszthetik ki, hogy előzőleg megfigyeléseket végeztek volna. Ha a gauge-szimmetria a természet működésének mindent nyitó kulcsa, akkor talán módszeres eljárás van a kezünkben új természeti törvények megfogalmazására, melyeket azután megfigyelésekkel és kísérletileg ellenőrizhetünk. A dolgok valódi állása azonban még távol van ettől. Azaz: bár a gauge-elméletek megjósolják, milyenfajta részecskék létezhetnek, de nem mondják meg, hogy az egyes fajtákon belül hányféle lehet. Így például bizonyítékaink vannak háromféle neutrinó és a velük kapcsolatban álló töltött részecskék (elektron, müon és tau-részecske) létezésére, de a velük kapcsolatos kölcsönhatások gauge-elméletének következményei nem árulják el, hogy ezenkívül hányféle eddig fel nem fedezett neutrinó létezhet még. A gauge-elmélet nem adja meg az elemi részecskék tömegét, amiként kölcsönhatásaik erősségének pontos értékét sem. Azt állítja, hogy bizonyos dolgok más dolgokkal arányosak, de nem határozza meg az arányossági tényezők értékét. Mond valamit a természeti törvények sémájáról, de a lehetséges részecsketípusokról vagy a természeti állandókról semmit. E hiányosságok nem olyan természetűek, hogy az ismert gauge-elméleteket a megfigyelésekkel ellentétbe hoznák. Ezek a kérdések a gauge-elméletek jelenlegi változatainak hatókörén kívül esnek. Azt tükrözik, hogy ezek az elméletek nem a természet legvégső leírásai, amit abból az egyszerű

tényből is gyaníthatnánk, hogy olyan sokféle van belőlük. A természet különböző erőinek sikeres gauge-elméletei mind különállóak, önmagukban teljesek és egymástól elszigeteltek. Meggyőződésünk, hogy a természet alapvető törvényei nem ilyenek. Ehelyett léteznie kell valamilyen mélyebb leírásnak, amelyben a természet sok-sok kölcsönhatása egyetlen erő különböző megnyilvánulásaiként jelenik meg. Az erre való törekvés régi álom, de igazán komolyan csak a hetvenes évek vége felé kezdődött el valóra váltása. Fontos felismernünk, hogy a mai részecskefizikusok elégedetlenek elméleteik jelenlegi változataival, még akkor is, ha mindegyik tökéletesen működik saját érvényességi területének *leírásaként*. A jobb és szélesebb körű elméletek keresésének indítóoka nem a *status quo* és a kísérleti eredmények közötti ellentmondás, hanem filozófiai eredetű elégedetlenség a létező elméletek érvényességi körének korlátai és egyetemességük hiánya miatt. Nyilvánvalóan nem teljesek, és nincsenek közöttük egyesítésüket elősegítő kapcsolatok. A haladás motorja itt nem egy összetört kuhni paradigma, hanem a vágy annak egyesítésére, amit az ember darabokra tört.

Mielőtt rátérünk arra, hogy létezik-e az összes természeti törvény mindent átfogó egyesítése – egy mindenre érvényes szimmetria –, jó, ha tudatosítunk egy igen fontos tényt a természet törvényeinek szimmetriájára vonatkozóan. Ez az a tény, amely oly nehézzé teszi a természeti törvények kikövetkeztetését a világ megfigyelése alapján.

Amikor azt mondjuk, hogy a természetnek van egyfajta szimmetriája, ezen azt értjük, hogy létezik egy bizonyos mennyiség, melynek megvan ez a szimmetriája, és ebből levezethetünk egy parciális differenciálegyenlet-rendszert, mely szintén rendelkezik ezzel a szimmetriával. Gyakorlatilag ezek az egyenletek a vizsgált létezők viselkedését szabályozó természeti törvényeink. A való világban azonban egyedi eseményeket és kölcsönhatásokat észlelünk, melyeket a törvényeket megtestesítő egyenletek egyes *megoldásai* írnak le. Az egyenletek megoldása azonban nem szükségszerűen mutatja az eredeti egyenletek szimmetriáját. Vizsgáljunk meg egy egyszerű példát! Ha hegyére állítva kiegyensúlyozunk egy ceruzát, akkor a gravitáció törvénye, mely meghatározza, hogyan dől el, mikor elengedjük, szimmetrikus abban az értelemben, hogy nem tüntet ki egyetlen irányt sem. Newton és Einstein matematikai egyenleteiben nem szerepel explicit módon az irány. A ceruzának azonban mindig *valamilyen* irányba kell dőlnie, amikor elengedjük. Más szóval, a törvény szimmetriája egy adott megvalósulásában eltűnik.

Némi gondolkodás után ez nyilvánvaló. Ebben a pillanatban a világegyetem egy megadott pontján ülök, amiként ön is. Láttuk azonban, hogy a természet törvényeinek invarianciája azonossá teszi őket a tetszőleges helyen tartózkodó

megfigyelők számára. E szimmetria az egyenes vonalú mozgás impulzusának megmaradását idézi elő. Egy ilyen térre érzéketlen törvénycsoportot egyedül akkor egyeztethetünk össze azzal, hogy megengedi számomra (és az ön számára), hogy a világegyetem egy adott helyén lehessünk, ha szimmetrikus törvények egyedi megnyivánulásainak nem kell ugyanolyan szimmetriákat tükrözniük. De más példát is választhatnak: az emberek szíve testük bal oldalán van. Lehetne mindegyikünk szíve a jobb oldalon, mint egy tükörképben, és testünk ugyanúgy működne. Feltehetően az első evolúciósan kialakult embernek „balszívűsége" volt, és ez tovább gyűrűzött, megszilárdult az öröklődés révén. Saját balszívűségünkből semmiképpen sem következtethetünk a természet alapvető törvényeinek balkezes voltára.

Ezért aztán a természet kutatása nehéz dolog. Akármerre nézünk, mélyen rejlő, talán szimmetrikus törvények aszimmetrikus egyedi megnyilvánulásait látjuk. Az igazi szimmetriák rejtettek. Törvényeket irányítanak, nem pedig azok megnyilvánulásait; mi csak a megsértett szimmetria következményeit észlelhetjük.

Amikor egy gauge-szimmetria megsérül egyik megnyilvánulásában, akkor valami szokatlan történik. A természeti erőhatás közvetítő részecskéje, melynek feladata a lokális gauge-szimmetria megvalósítása, tömeggel rendelkezővé válik. Úgy gondolják, hogy ez a mechanizmus a tömeg eredete. Valójában van egy mélyebben rejlő energiamező, az úgynevezett Higgs-tér (Peter Higgs edinburgh-i fizikus után), amely áthatja a tér minden pontját, és ez okozza a közvetítő részecske tömegének megjelenését, amikor a szimmetria megsérül. Egyes gauge-szimmetriák, mint például az elektromágneses és gravitációs erőterekért felelősek, nem sérülnek meg, ezért a nekik megfelelő közvetítő részecskék, a fotonok és gravitonok tömeg nélküliek maradnak. A gyenge kölcsönhatással kapcsolatos gauge-szimmetria azonban megsérül, így a közvetítő részecskéknek, a W és Z bozonoknak tömegük lesz.

Egyesítés

A fizika csatamezejét az egyesített térelméletek tetemei borítják.

Freeman Dyson

Egy mindenre kiterjedő, a fizika egész épületét átfogó elmélet álma, egy olyan elméleté, mely a természet különböző erőit pusztán egy mélyebben rejlő hatás megnyilvánulásaiként írná le, sok nagy fizikust felébresztett szender-

géséből, melyre a *status quo*val való elégedettség késztette őket. Eddington és Einstein a leghíresebb úttörői egy lenyűgöző, az elektromosságot, mágnesességet és a gravitációt egyesítő „minden létező elmélete" megalkotásának, és az egyesítés belső logikája mögött megjelennének a természet állandóinak sajátos értékei. Bár utólag látjuk, hogy ezek a képzeletgazdag úttörők rossz helyen keresték a fizika eme Szent Grálját, és akkor veselkedtek neki a feladat megoldásának, amikor még azt sem tudták, hogy mit kell egyesíteni, mégis egy látomást láttak, mely azóta is a fizika végső elméleti kihívása, egy új Ensteinre várva, aki majd sikeresen megküzd vele.

1975 után újra komoly munka kezdődött a természet ismert törvényeinek egyesítésére egy „nagy egyesített elméletbe", ahogyan ma nevezzük. A természet gauge-szimmetriáinak nyilvánvalóan sikeres kiaknázásától sarkallva az elméleti fizikusok megpróbálták az elektromágnesességet, valamint az erős és gyenge kölcsönhatásokat külön-külön képviselő szimmetriákat egy nagyobb, mindent átfogó szimmetriába beépíteni. Az egyesítő szimmetria lehetséges alakja néhány fontos vonatkozásban korlátozott, mert az alkotó szub-szimmetriáknak logikailag ellentmondásmentesen kell beleilleszkedniük. Durván fogalmazva, olyannak kell lennie a matematikai szimmetriaműveletekben, mint az aritmetikában a prímszámoknak (például 7 vagy 11) – nem szabad, hogy felbontható legyen szubszimmetriák párjaira. Ezek a feltételek egy sor szimmetriajelöltet eredményeznek, melyek fizikai értelmét előbb ki kell fejtenünk, hogy eldönthessük, vajon a világ pontos leírását nyújtják-e.

Elsőre különösnek látszik, hogy az eltérő természeti erők bármiféle egyesítésére akár csak gondoljunk is. Hogyan is várhatnánk, hogy a gravitációt és az elektromágnesességet az erős és gyenge kölcsönhatásokkal egyesíteni lehet, mikor mindezen hatásoknak olyan eltérő hatótávolsága és erőssége van. A gravitáció hatása az elektromágnesességénél 10^{39}-szer gyengébb! Sőt, a különbözőségek még szélesebb körűek: mint kiderült, a különböző erők az elemi részecskék eltérő, egymást kizáró csoportjaira hatnak. Amikor Eddington és Einstein a természet egyesített elméletét keresték, az elemi részecskék világának gazdagságát még nem ismerték. Amikor a mikrovilág bonyolultságát felfedezték, a fenti alapvető problémák miatt nem siettek új, egyesített leírásokat alkotni: a természet erői mennyiségi és minőségi szempontból olyannyira különbözőek, amennyire csak négy dolog különbözhet egymástól.

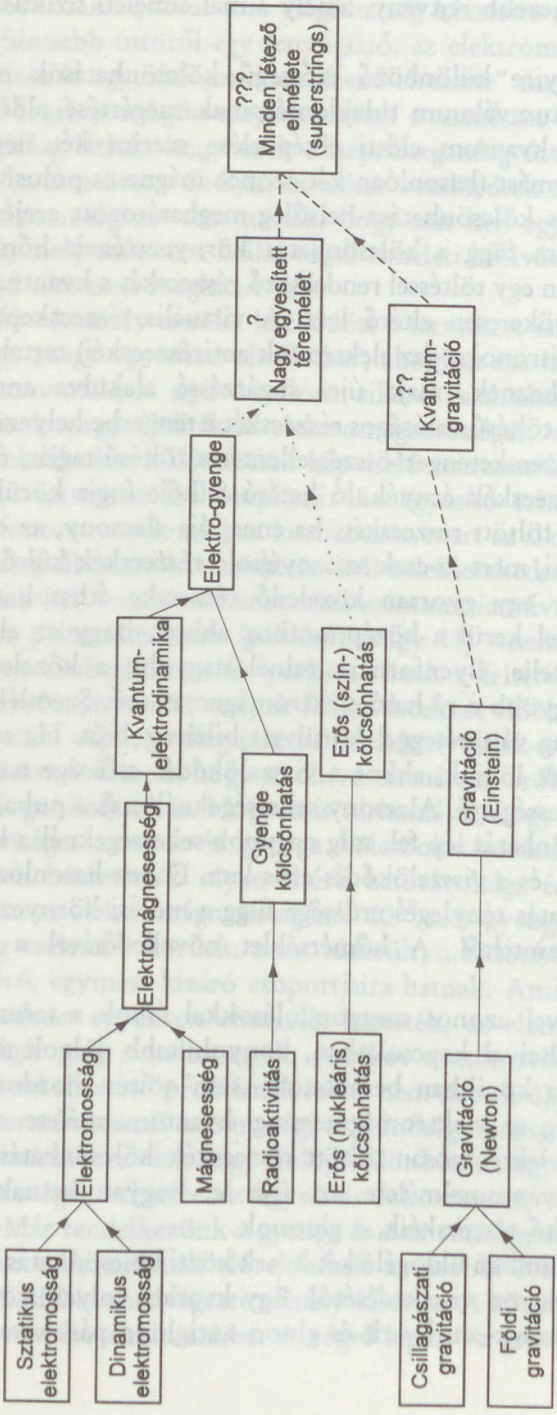
A fenti nehézségek ellenére az egyesítés fokozatosan, részletről részletre lehetővé válik. Már rendelkezünk a gyenge és elektromágneses kölcsönhatások egyesített elméletével, melynek előrejelzéseit az utóbbi években gyönyörűen bizonyította a CERN-ben elvégzett néhány kísérlet. A következő lépés az erős kölcsönhatás beépítése a szintézisbe. A végső lépés – a gravitáció beépítése az

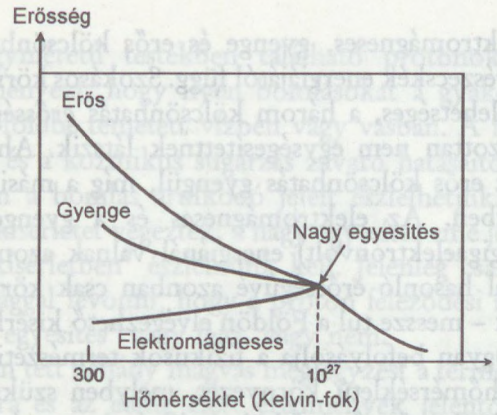
elméletbe – a legnehezebb rejtvény, amely a mai elméleti fizikusok figyelmét leköti.

A látszólag ennyire különböző erősségű kölcsönhatások egyesítésének problémáját a kvantumvákuum tulajdonságainak megértése oldotta meg. Az elektromágnesesség kvantum előtti elképzelése szerint két negatív töltésű elektron taszítja egymást (hasonlóan két azonos mágneses pólushoz), a természet elektromágneses kölcsönhatása belsőleg meghatározott erejének megfelelően, de az erő nem függ a kölcsönhatás környezetének hőmérsékletétől. Helyezzünk azonban egy töltéssel rendelkező részecskét a kvantumvákuumba, ekkor a helyzet gyökeresen eltérő lesz. A virtuális részecskepárok tengere elektronokat és pozitronokat (az elektronok antirészecskéi) tartalmaz, melyek folyamatosan keletkeznek, majd újra sugárzássá alakulva annihilálódnak. Amikor egy negatív töltésű valóságos részecskét e tengerbe helyezünk, vonzani kezdi a virtuális részecsketenger összes ellentétes töltésű tagját, és így pozitív töltésű virtuális részecskék árnyékoló hatású felhője fogja körülvenni. Ezért aztán egy közeledő töltött részecskét, ha energiája alacsony, az elektron csak gyengén fog taszítani, mert az csak az árnyékoló részecskék külső rétegét tudja elérni. Ugyanakkor egy gyorsan közeledő részecske áthatol az árnyékoló felhőn, és elég közel kerül a középponthoz ahhoz, hogy az elektron teljes taszító erejét érzékelje. Ilyenformán minél nagyobb a közeledő részecske energiája, annál nagyobb a rá ható elektromágneses erő. Szemléletes hasonlat elképzelni két vastag vattaréteggel körülvett biliárdgolyót. Ha ezeket a puha tárgyakat egymásnak lökjük, akkor a visszalökődés erőssége nagymértékben függ az ütközés sebességétől. Alacsony sebességeknél csak a puha, külső részek közti gyenge kölcsönhatás lép fel, míg nagyobb sebességeknél a kemény belső magok találkoznak, és a visszalökődés erős lesz. Ehhez hasonlóan az elektromágneses kölcsönhatás tényleges erőssége függ a mérési környezet hőmérsékletétől és energiaszintjétől. A hőmérséklet növekedésével a kölcsönhatás *erősebb* lesz.

Amikor a fentivel azonos meggondolásokkal élünk a természet erős és gyenge kölcsönhatásaival kapcsolatban, bonyolultabb dolgok történnek. Az erős kölcsönhatás a korábban bemutatott „szín"-töltést hordozó részecskék között lép fel. Míg az elektromágnesesség kvantumelmélete annak leírása, hogyan lépnek az elektromosan töltött részecskék kölcsönhatásba a fénnyel, addig a színerő kvantumelmélete azt írja le, hogyan hatnak egymásra a kvarkok és közvetítő részecskéik, a gluonok.

A kvantumvákuumban üldögélő két kvark közti kölcsönhatás meglehetősen különbözik két elektron viselkedésétől. Egy kvarkot folyamatosan keletkező és megsemmisülő kvark–antikvark és gluon–antigluon párok vesznek körül.


???
Minden létező elmélete (superstrings)
?
Nagy egyesített térelmélet
??
Kvantum-gravitáció
Elektro-gyenge
Kvantum-elektrodinamika
Elektromágnesesség
Gyenge kölcsönhatás
Erős (szín-) kölcsönhatás
Gravitáció (Einstein)
Elektromosság
Mágnesesség
Radioaktivitás
Erős (nukleáris) kölcsönhatás
Gravitáció (Newton)
Sztatikus elektromosság
Dinamikus elektromosság
Csillagászati gravitáció
Földi gravitáció



4.3 ábra. Az erős, gyenge és elektromágneses kölcsönhatások aktuális „erősségének" változása a mérésben szereplő részecskék energiájának függvényében. A változást a kvantumvákuum tulajdonságai hozzák létre

A gluonok nem olyanok, mint az elektromágneses tér közvetítő részecskéi, melyek a virtuális elektronok és pozitronok mellett megjelennek. A fotonoknak nincs elektromos töltése, a gluonok viszont rendelkeznek azzal a színtöltéssel, melynek hatását közvetítik. Míg a virtuális antikvarkok a vákuumban lévő kvark köré igyekeznek, vagyis annak színtöltését árnyékolják, addig a gluonok elsősorban az azonos töltésű kvarkok köré gyűlnek, így annak a középpontban elhelyezkedő színtöltését „szétkenik" nagyobb térfogatba. Ez a folyamat a virtuális antikvarkok által előidézett színtöltés szétválása ellen dolgozik. Melyik folyamat győzedelmeskedik? Ha kevesebb, mint nyolc különböző kvarkfajta létezik, akkor a gluonok által előidézett színtöltés-„szétkenés" érvényesül. Ebben az esetben a helyzet a következő: minél nagyobb a környezet hőmérséklete, annál nagyobb az egymáshoz közeledő kvarkok energiája, és egymás középpontjához annál közelebb képesek jutni. Minél közelebb kerülnek azonban egymáshoz, annál inkább kiterjedtnek fogják érezni a taszító színtöltést, és ezért a fellépő kölcsönhatás annál *gyengébb* lesz. Ez a hatás teljesen ellentétes azzal, ami az elektromágneses kölcsönhatás során történik, s ez azt jelenti, hogy az erős kölcsönhatás fokozatosan gyengébbé válik a kölcsönhatás energiájának növekedésével.

Ezt a jelenséget *aszimptotikus szabadságnak* nevezik, azt a tényt hangsúlyozandó, hogy az energia növekedésével a kölcsönhatás mind gyengébbé válik, így határesetben (aszimptotikusan) a részecskék úgy viselkednek, mintha mindenféle erő hatásától mentesek lennének. A fentihez hasonló meggondolások azt mutatják, hogy a gyenge kölcsönhatás tényleges erőssége is változik, amint a részecskék energiája nő.

Így tehát az elektromágneses, gyenge és erős kölcsönhatások erőssége a mérésben szereplő részecskék energiájától függ. Szokásos környezeti hőmérsékleten, ahol az élet lehetséges, a három kölcsönhatás erőssége nagyon különbözőnek és határozottan nem egységesítettnek látszik. Ahogyan azonban a hőmérséklet nő, az erős kölcsönhatás gyengül, míg a másik kettő erősödik, különböző mértékben. Az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatások mintegy 90 GeV (gigaelektronvolt) energiánál válnak azonos erősségűvé, az erős kölcsönhatással hasonló erősségűvé azonban csak körülbelül 10^{15} GeV energiánál válnának – messze túl a Földön elvégezhető kísérletek lehetőségein.

Látjuk tehát, hogyan befolyásolja a fizikusok természeti erőkről alkotott képét az alacsony hőmérsékletű környezet, melyben szükségszerűen élniük kell. A látszólag különböző erősségű kölcsönhatások egyesítésének kvantitatív problémáját a kvantumvákuum tulajdonságai megoldják. Ám ez még mindig megoldatlanul hagyja a minőségi problémát. Tudomásunk szerint a kvarkok „színnek" nevezett, megmaradó töltést hordoznak, míg a leptonok (mint az elektron és a müon) nem. Tapasztalatunk így meggyőzött minket arról, hogy nincs mód arra, hogy egy kvark leptonná alakuljon át, vagy megfordítva. A kvarkok leptonokkal való kölcsönhatását irányító erők egyesítésének az a feltétele, hogy létezzenek eddig még fel nem fedezett részecskék, melyek a közöttük fellépő kölcsönhatást közvetíthetnék. Ezek a részecskék tömegesen csak roppant nagy energiáknál jelenhetnének meg, ahol az egyesítés megtörténik. Nyugvó tömegüknek tehát hozzávetőleg az egyesítési energiának megfelelő mértékűnek kell lennie. A dolgok ilyetén állása fölöttébb valószínűtlenné teszi, hogy ezen egyesítés következményei a mindennapi élet alacsony energiaszintjei mellett észrevehetően megnyilvánuljanak – még a részecskefizikai kísérletekben sem. Hasonló logikát követtek az elektromágneses és gyenge kölcsönhatások egyesítése során, amely mintegy 90 GeV energiánál történik meg. Annak feltétele, hogy ez az egyesítés megnyilvánuljon, az, hogy léteznie kell három új elemi részecskének, az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egyesítési energiájához igen közel álló értékű tömeggel. E három részecskét néhány évvel ezelőtt felfedezték – pontosan a megjósolt tömeggel –, nevük W^+, W^- és Z bozon. A 10^{15} GeV energiánál bekövetkező nagy egyesítéskor keletkező, szintúgy feltételezett nehéz bozonokat, ha jelenlegi elképzeléseink helyesek, csak közvetett hatásaik révén észlelhetjük. Létezésük legfeltűnőbb következménye az volna, hogy a protonok nem lennének stabilak, hanem leptonokra, mezonokra és fotonokra bomlanának. Ezt úgy képzelhetjük el, mint egy újfajta radioaktivitást. Azt várjuk, hogy a protonok feleződési ideje 10^{31} évnél hosszabbnak bizonyul. E feleződési idő azt jelenti, hogy az olvasó testében élete során egy proton bomlik el. 10^{31} év rendkívül

hosszú idő; a nagyméretű testekben található protonok hatalmas száma azonban azt eredményezi, hogy ilyen bomlásokat a gyakorlatban is észlelhetünk ezer tonna földbe temetett vízben vagy vasban. A föld alatt, a detektorokkal körülvett és a kozmikus sugárzás zavaró hatásaitól a földréteg által elszigetelt anyagban a bomlás árulkodó jeleit észlelhetjük. Annak ellenére, hogy számos ilyen kísérletet végeztek, a nagy egyesítés eme jellegzetes nyomait legalább még egy kísérletben* észlelnünk kell. Jelenleg csak azt a következtetést lehet biztonsággal levonni, hogy a proton feleződési ideje meghaladja a 10^{32} évet. A „nagy egyesítés" vagy igaz, vagy nem.

Richard Feynman tett néhány magvas megjegyzést a természet szimmetriája keresésének irányára és az eddig elért eredmények jelentőségére. Megfelelő gauge-elméleteink vannak a természet különböző kölcsönhatásaira; szerkezetük lenyűgözően hasonlít egymásra. De miért annyira hasonló – kérdezi Feynman – a fizika összes gauge-elmélete?

> Több lehetőség áll fenn. Az első az, hogy a fizikusok képzelőereje korlátozott: amikor új jelenséget észlelünk, megpróbáljuk korábban felépített rendszerünkbe beilleszteni – amíg nem végeztünk el jó néhány kísérletet, nem tudjuk, hogy ez helytelen. Így aztán amikor egy ostoba fizikus előadást tart a kaliforniai egyetemen Los Angelesben [Feynman intézetének közeli vetélytársa!] 1983-ban, és azt mondja: „A dolgok így és így állnak, nézzétek, milyen csodálatosan hasonlítanak egymásra az elméletek!" –, akkor ez nem azért van, mert a természet *valóban* hasonló, hanem azért, mert a fizikusok csak ugyanazt az átkozott dolgot tudják elképzelni újra meg újra.
>
> A másik lehetőség az, hogy ez *tényleg* ugyanaz a dolog újra meg újra – azaz, hogy a természet csak egyféleképpen tudja a dolgokat csinálni, és időről időre megismétli a saját sztoriját.
>
> A harmadik lehetőség pedig az, hogy a dolgok azért látszanak hasonlónak, mert ugyanannak a valaminek a különböző oldalai – egy mélyebben fekvő, átfogóbb dologéi, melyet széttörhetünk úgy, hogy darabjai különbözőnek látszanak, éppúgy, mint az egy kézen lévő ujjak esetében.

A természet összes erői egyesítésének e keresése technikailag folyamatosan fejlődik ugyan, de még el kell jutnia egy olyan kísérletileg bizonyítható szimmetriához, amely végül is megoldja. Nincs szándékunkban e fejlődést

*Eddig csak egyetlen kísérletben találtak olyan nyomokat, amelyek esetleg a proton bomlásának eredményei lehettek. – *A ford.*

részletesen leírni, pusztán jelezni szeretnénk, hogy a természet törvényeinek milyen új oldalait gyanítják. A legmeglepőbb új fejlemény egy régi eszme leporolása és újjáalakítása volt.

Egy új dimenzió

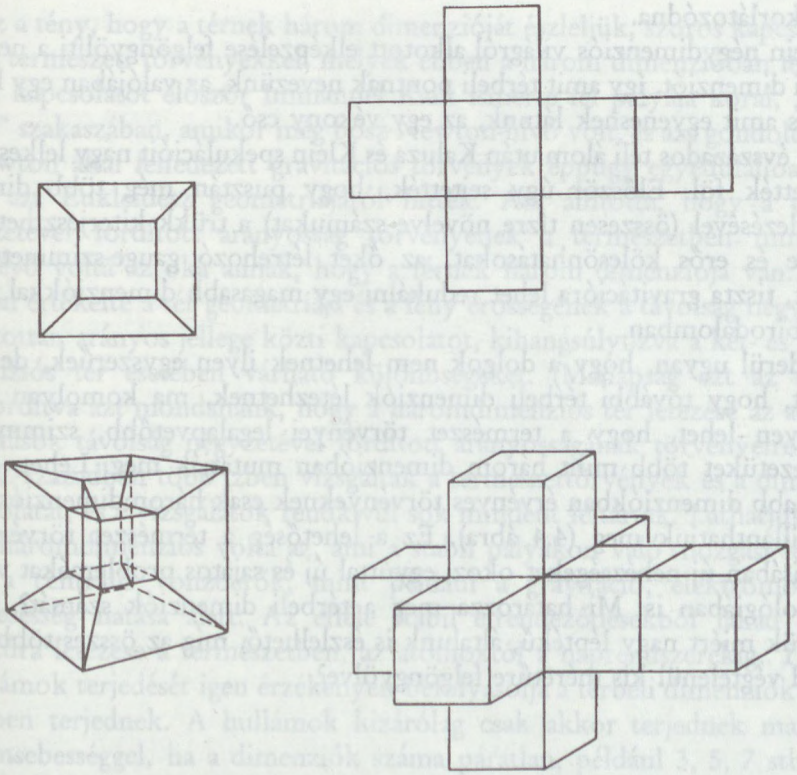
> Az az ötlet, hogy egy ötdimenziós, hengeres világ feltételezésével megkaphatjuk [a nagy egyesített térelméletet], soha nem jutott eszembe. ... Elképzelése rendkívül tetszik nekem.
>
> Albert Einstein (Theodor Kaluzához)

Einstein 1919-ben, nem sokkal azután, hogy forradalmi jelentőségű általános relativitáselméletét kidolgozta, levelet kapott Theodor Kaluzától, egy kevéssé ismert matematikustól, aki a königsbergi egyetemen dolgozott, ahol egykor Immanuel Kant is élt és munkálkodott. Kaluza észrevette, hogy ha Einstein gravitációs elméletét egy olyan világra vonatkozóan fejti ki, mely a sajátunkénál eggyel több térbeli dimenziót tartalmaz, akkor az matematikailag egyenértékűvé válik a háromdimenziós világról kifejtett Einstein-féle gravitációs elmélet és a Maxwell-féle elektromágneses elmélet egyesítésével. A világ extra dimenzióval való kibővítése révén az elektromágnesesség és gravitáció két jelensége pusztán a gravitációra redukálható. Az elektromágneses jelenségek megmaradó mennyiségeit létrehozó absztrakt szimmetriák a négydimenziós gravitációs elméletben pusztán annak feltételévé válnak, hogy az elmélet általános értelemben kovariáns legyen, ami azt jelenti, hogy egyenleteinek bármely koordináta-rendszerben azonos alakúnak kell lenniük, ahogyan azt Einstein minden fizikai törvénytől megkövetelte.

Az elképzelés Einstein számára annyira idegennek látszott, hogy két évig magánál tartotta Kaluza kéziratát, mielőtt jóváhagyta volna kiadását. Végül aztán 1921-ben a Porosz Akadémia közölte a munkát. Kevesen vették komolyan. Valójában még kevesebben voltak, akik komolyan tudták volna venni; a mindössze három dimenzióra kifejtett, Einstein-féle gravitációs elméletben alkalmazott matematika a legtöbb korabeli tudós számára nem volt magától értetődő. Az extra dimenzió hozzáadása még nehezebben felfogható absztrakció volt. Ezenkívül Kaluza nem szolgált semmiféle megfigyelésen alapuló bizonyítékkal vagy kísérleti bizonyítási lehetőséggel elmélete támogatására. Elmélete csak egy csinos matematikai elképzelés volt. Manapság a fizikusok sokkal inkább hajlamosak csinos matematikai elképzeléseket elfogadni. 1921-ben ez a fajta érzékenység nem volt ilyen kifinomult.

Kaluza elképzelésének megértéséhez meg kell magyaráznunk, hová tűnt az extra dimenzió. Miért nem észleljük? Miért látszik a világegyetem háromdimenziósnak, ha valójában négydimenziós?

Kaluza azt vetette fel, hogy a tér extra dimenziója valamilyen alapvető módon különbözhet a másik háromtól. 1926-ban Oskar Klein svéd matematikus továbbfejlesztette Kaluza felvetését, összekapcsolta a fizikával.



4.4 ábra. *a)* Ha egy háromdimenziós, kocka alakú testet tükörben nézünk, akkor úgy látjuk, mint két négyzetet, melyek sarkait négy vonal köti össze. Nem tudjuk elképzelni, hogyan nézne ki a kocka négydimenziós változata, de ha tükörben néznénk, akkor úgy látszana, mint a *(b)* három dimenzióban szemléltethető alak. Két, egymással tizenkét felület által összekötött kockának látszana, minden egyes felület a belső kocka egyik éléről indulna, és a külső kocka megfelelő éléhez érkezne. Ha kiterítjük a kétdimenziós négyzet határoló vonalait egy dimenzióba, akkor egy vonalat kapunk, melyet négy egyforma hosszú él alkot. Ha kiterítjük a háromdimenziós kocka határoló felületeit két dimenzióba, akkor egy hat egyenlő négyszögből álló keresztet kapunk *(c)*. Ennek megfelelően, ha kiterítenénk a (nem szemléltethető) négydimenziós kocka határoló testjeit három dimenzióba, akkor az egy nyolc egyforma kockából álló kétszeres keresztnek látszana *(d)*

Klein kimutatta, hogy ha ez a dimenzió az elektromágnesesség és a gravitáció kapcsolatát közvetíti, akkor természetes dolog, hogy kiterjedése kicsiny – esetleg nem nagyobb 10^{-33} centiméternél –, így sem a mindennapi életben, sem pedig az eddig végrehajtott kísérletekben nem vennénk észre. Olyan helyzetben lennénk, mint a lapos bogarak, amelyek a Föld sík felszínén járvakelve nincsenek tudatában a fölöttük lévő magasságnak. Bár széles körű tapasztalatokkal rendelkezhetnénk „lapvilágunk" felszínéről, a merőleges harmadik dimenzióra vonatkozó tapasztalatunk apró, észrevehetetlen távolságra korlátozódna.

Klein négydimenziós világról alkotott elképzelése felgöngyölíti a negyedik térbeli dimenziót, így amit térbeli pontnak nevezünk, az valójában egy kicsiny kör, és amit egyenesnek látunk, az egy vékony cső.

Fél évszázados téli álom után Kaluza és Klein spekulációit nagy lelkesedéssel élesztették föl. Először úgy sejtették, hogy pusztán még több dimenzió feltételezésével (összesen tízre növelve számukat) a trükk kiterjeszthető, és a gyenge és erős kölcsönhatásokat, az őket létrehozó gauge-szimmetriákkal együtt, tiszta gravitációra lehet redukálni egy magasabb dimenziókkal rendelkező birodalomban.

Kiderül ugyan, hogy a dolgok nem lehetnek ilyen egyszerűek, de azt az ötletet, hogy további térbeli dimenziók létezhetnek, ma komolyan veszik. Könnyen lehet, hogy a természet törvényei legalapvetőbb, szimmetrikus szerkezetüket több mint három dimenzióban mutatják meg. Lehet, hogy a magasabb dimenziókban érvényes törvényeknek csak háromdimenziós árnyékát pillanthatjuk meg (4.4 ábra). Ez a lehetőség a természet törvényeinek feltárásában új nehézségeket okoz, egyúttal új és sajátos problémákat vet fel a kozmológiában is. Mi határozza meg a térbeli dimenziók számát? Három közülük miért nagy léptékű, általunk is észlelhető, míg az összes többi miért marad végtelenül kis méretűre felgöngyölve?

Miért három térbeli dimenzió létezik?

Két dimenzióban bármely két egyenes szinte bizonyosan találkozik előbb vagy utóbb; három dimenzióban azonban, s még inkább négy dimenzióban, két egyenes el tudja kerülni, és általában el is kerüli egymást, s így az a megfigyelés, hogy találkoznak, valóban növeli tudásunkat.

A. S. Eddington

Az a tény, hogy a térnek három dimenzióját észleljük, szoros kapcsolatban van a természeti törvényekkel, melyek ebben a három dimenzióban léteznek. Ezt a kapcsolatot először Immanuel Kant ismerte fel pályája korai, „kritika előtti" szakaszában, amikor még bősz Newton-hívő volt, és azt gondolta, hogy a Newton által felfedezett gravitációs törvények éppúgy egyedülállóak, ahogyan azt Eukleidész geometriájáról hitték. Azt állította, hogy a távolság négyzetével fordított arányosság törvényének a természetben mindenhol jelenlévő volta az oka annak, hogy a térnek három dimenziója van. Kepler szintén értékelte a tér geometriája és a fény erősségének a távolság négyzetével fordítottan arányos jellege közti kapcsolatot, kihangsúlyozva a két- és háromdimenziós tér esetében várható különbségeket. (Manapság ezt az érvelést megfordítva azt mondanánk, hogy a háromdimenziós tér létezése az alapvető erőhatások távolság négyzetével fordított arányosságának törvényeire vezet.) A XX. században több ízben vizsgálták a természettörvények és a dimenziók kapcsolatát, és e vizsgálatok rendkívül sok mindent feltártak. Láthatjuk, hogy a tér háromdimenziós volta az, ami a stabil pályákon való mozgást lehetővé teszi a centrális vonzóerők, mint például a gravitáció, elektromosság és mágnesesség hatása alatt. Az efféle stabil elrendeződésekből fakad számos struktúra létezése a természetben, az atomoktól a naprendszerekig. Továbbá a hullámok terjedését igen érzékenyen befolyásolja a térbeli dimenziók száma, melyben terjednek. A hullámok kizárólag csak akkor terjednek maximális hullámsebességgel, ha a dimenziók száma páratlan, például 3, 5, 7 stb. Ha a dimenziók száma páros, akkor a hullámok egy része a maximális sebességnél kisebb, tetszőleges sebességgel terjed. Ennek eredménye, hogy nem közvetíthetők egyértelmű jelek. A jelsorozat egy része más időpontban érkezik a célba, mint a többi. Ha figyelmünket a páratlan számú dimenzióval bíró terekre korlátozzuk, azt találjuk, hogy amint a dimenziók száma meghaladja a hármat, a hullámok terjedés közben eltorzulnak. Csak háromdimenziós térben terjednek a hullámok torzítástól és visszaverődésektől mentesen, aminek fontos következményei vannak a természet minden olyan területén, ahol a világegyetem működésének alapja a hullámterjedés. Kvantumhullámok, agyhul-

lámok, gravitációs hullámok, elektromágneses hullámok – az őket irányító törvények alakja és a velük kacsolatos természeti jelenségek mind elválaszthatatlanul össze vannak kötve a tér dimenzióinak számával. Csak három dimenzióban azonos a dimenziók száma azoknak a tengelyeknek a számával, amelyek körül az elforgatásokat végrehajthatjuk. Eme egyszerű tény az elektromágneses törvények egész formáját megszabja.

A háromdimenziós tér e sajátos tulajdonságai miatt fölöttébb nehéz elképzelni, hogyan keletkezhetett volna bármiféle kémiai alapú élet, ha a világegyetemnek háromnál több nagy léptékű dimenziója lett volna. Lehetünk azonban kevésbé antropocentrikusak is a háromdimenziós tér sajátos tulajdonságainak megítélésében. A matematikusok újra meg újra azt tapasztalják, hogy a három- és négydimenziós tereknek szokatlan és egyedülálló tulajdonságaik vannak, melyeket egyéb terekben nem találunk meg. Az ilyen alacsony dimenziószámú terek vizsgálata tulajdonképpen a matematika önálló területét alkotja, elkülönülve a négynél több dimenziójú terek vizsgálatától. Talán felfedezzük majd, hogy a három- és négydimenziós terek sajátos tulajdonságai fontos dolgokat árulnak el az általunk észlelt háromdimenziós térről és a négydimenziós téridőről. Ha a térnek valóban háromnál több dimenziója van, de az extra dimenziók végtelenül kicsiny méretekre vannak felgöngyölve, akkor meg kell tudnunk, hogy közülük miért csupáncsak három válhatott nagy léptékűvé. Ugyanis a dolgok ilyetén állása az, ami a természeti törvények formáját nagyrészt megszabja. Ma még nem tudjuk, hogy vajon a térnek csak három nagy léptékű dimenziója létezhetett-e, de kezdjük azt gyanítani, hogy bonyolult szervezetek számára csak a három nagy léptékű dimenzióval bíró terek lennének felfoghatók. Ha a világegyetemnek valaha sokkal több térbeli dimenziója volt, akkor meg kell állapítanunk, hogy volt-e valamilyen véletlenszerű tényező a dimenziók táncában, amely három, később az általunk lakott térré vált dimenzió elkülönülését eredményezte. Vajon lehetett-e egykoron négy vagy öt dimenzió, melyek közül néhány megszökött, vagy létezik a természetnek egy olyan, mélyen rejlő tulajdonsága, amely biztosította, hogy mindenkor csak három létezhetett?

Melyek az anyag végső építőkövei?

Vizsgáztató: Mi az elektromosság?
Jelölt: Ó, uram, biztos, hogy megtanultam – biztos vagyok benne, hogy *tényleg* tudtam – de elfelejtettem.
Vizsgáztató: Milyen kár. Mindössze két személy tudta valaha is, hogy mi az elektromosság: a természet Alkotója és Ön. Most az egyikük elfelejtette.

Szóbeli vizsga az oxfordi egyetemen, 1890 körül

A XX. századi fizikusok által elfogadott és szabatos matematikai formába öntött atomista eszmék számos szimmetriát eredményeztek, melyek megengedik bizonyos típusú részecskék létezését és szigorúan meghatározott módon történő kölcsönhatásukat. Bizonyos értelemben ezek a szimmetriák nem mások, mint maguk a természeti erők. Ez vagy a természet lényegből fakadó matematikai jellegének következménye, vagy, ahogyan Kant állította volna, csupán elkerülhetetlen következménye annak, hogy a természet leírásának agyunk számára felfoghatónak kell lennie. Ezt a magasabb szintű kérdést most egy pillanatra félretéve látjuk, hogy pontosan meg kell tudnunk, melyek a természet legelemibb alkotórészei, ha a szimmetriák szerepét megfelelő perspektívába kívánjuk helyezni. Röviden: tudnunk kell, mit irányítanak a természet törvényei. Melyek a világegyetem alapvető elemei?

A mai fizikusok hagyományosan feltételezték, hogy az alapvető elemeknek „pontoknak" kell lenniük, vagyis olyan létezőknek, melyeknek mérete zéró. A gauge-szimmetriák által irányított legalapvetőbb dolgoknak általában a kvarkokat és leptonokat tekintik. Feltételezik, hogy ezek pontszerű részecskék. A gyakorlatban ez az elképzelés nem jelent többet annál, hogy amikor egyéb részecskékkel ütköznek, úgy verődnek vissza, mintha pontszerűek lennének. Előfordulhat, hogy az elemi részecskék világáról nyert tapasztalatunk korlátozott, és még fel kell fedeznünk, hogy a kvarkok és leptonok további alkotóelemekből állnak. Akár így van, akár nem, tagadhatatlan, hogy egészen a legutóbbi időkig az a nézet uralkodott, hogy a legalapvetőbb létezők térbeli pontok. A kvantumtérelméletek ezt a feltételezést matematikailag építették magukba. Bármilyen sikeresek is azonban ezek az elméletek a természet különböző kölcsönhatásainak leírásában, úgy látszik, hogy egy, csak rájuk jellemző „betegségben" szenvednek, amely megakadályozza a természet összes erőinek egyesítésére irányuló próbálkozásokat. Kiderült, hogy a természetben megfigyelt bizonyos mennyiségek kiszámítására irányuló próbálkozások ezekben az elméletekben végtelen nagy értékeket eredményeznek. Ezeket a végteleneket csak némi bűvészkedéssel lehet kiküszöbölni. Sőt, bizonyos

esetekben még úgy sem. Amikor a számításokat végrehajtjuk, a műveletek a számszerű eredményt végtelen számú tag összegeként adják meg. Egy „jó" elmélettől azt várjuk el, hogy e végtelen összeg egymásra következő tagjai olyan gyorsan csökkenjenek, hogy összegük egyre közelebb kerüljön egy meghatározott értékhez, ahogy mind több és több tagot adunk össze. Egyszerű példa erre az alábbi sor:

$$1/1^2 + 1/2^2 + 1/3^2 + 1/4^2 + \ldots \textit{ ad infinitum.}$$

Ha egyre több tagot számolunk ki és adunk össze, azt találjuk, hogy az összeg egyre közelebb kerül 1,64-hez. Ténylegesen a végtelen sor összege (határértéke):

$$\pi^2/6 = 1{,}644934\ldots$$

Ha azonban a következő sort vesszük:

$$1/1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/5 + 1/6 + \ldots \textit{ ad infinitum,}$$

akkor azt találjuk, hogy a részletösszegek nem közelednek egy meghatározott értékhez. Egyre jobban növekednek. A fentinek megfelelő végtelen tagú összeg *végtelen* eredményre vezet, annak ellenére, hogy az egymásra következő tagok mind kisebbé válnak. Az ilyen sort *divergensnek* nevezzük. Meglehetősen könnyű ellenőrizni, hogy a második sor divergens, egyszerűen 2, 4, 8, 16 stb. tagú csoportokba rendezve egymásra következő tagjait:

$$1/1 + 1/2 + [1/3 + 1/4] + [1/5 + 1/6 + 1/7 + 1/8] + \\ + [1/9 + \ldots + 1/16] + [1/17 + \ldots + 1/32] + \ldots$$

Minden egyes szögletes zárójelbe tett csoport összege több, mint 1/2. Végtelen számú ilyen csoport lesz, ezért az összegük végtelen számú 1/2 összege, vagyis *végtelen*. Valami nyilvánvalóan nincs rendben egy ilyen eredményt adó fizikai elméletben. Olyan ez, mintha egy komoly programozási hibát tartalmazó számviteli programunk lenne.

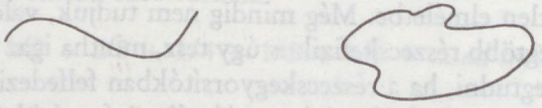
1984-ben két fizikus, Michael Green a londoni egyetemen és John Schwarz a kaliforniai Technológiai Intézetben, figyelemreméltó felfedezést tett. Kimutatták, hogy ha feladjuk azt az elképzelést, hogy a természet alapvető elemei pontszerűek, és vonalakkal, vagy ahogy ismertté váltak, *„fonalakkal"* helyettesítjük őket, akkor a kvantumtérelméletek összes betegsége csodálatos módon megszűnik, és a természet összes lehetséges szimmetriájának leírását elegánsan két lehetséges esetre szűkíthetjük – kilenc térbeli és egy időmen-

zióval, illetve 25 térbeli és egy idődimenzióval rendelkező világokra. E megoldás néhány kellemes tulajdonságát már tíz évvel korábban felismerték, de a háromnál több térbeli dimenzió ötletét akkor nem vették komolyan. Ez még Kaluza és Klein elképzeléseinek felélesztése előtt történt. Ezért az ilyenfajta vizsgálódás kiszorult az elemi részecskék kutatásának homlokteréből. Csak az igazán makacs tudósok, mint Green és Schwarz, ragaszkodtak a fonalak ötletéhez, míg mások siettek kiaknázni a gauge-elméletek sikereit. Egy idő után kiderült, hogy a természet fonalelméletének egy másik korai problémája – a fénynél gyorsabban mozgó, „tachyon" nevű részecskék létezésének előrejelzése, ami önellentmondást visz a természet leírásába – eltűnik, ha az úgynevezett „szuperszimmetria" tulajdonságot beépítik az elmélet formalizmusába. Ez vonzó lépés volt, mert a gauge-elmélettel foglalkozó fizikusok ezt a matematikai szimmetriát a különböző belső perdülettel rendelkező elemi részecskék egyesítése céljából dolgozták ki. Tulajdonképpen az anyagot és a sugárzást egyesítette egyetlen elméletbe. Még mindig nem tudjuk, valóságos-e a szuperszimmetria. A legtöbb részecskefizikus úgy tesz, mintha igaz volna, de ezt csak akkor fogjuk megtudni, ha a részecskegyorsítókban felfedezik azokat az extra elemi részecskéket, amelyek létezését megjósolja. A fonalakból (angolul: string) ily módon „szuperstring"-ek lettek, és magukban foglalják az összes általuk birtokolható szimmetriát.

Ennél a pontnál érdemes megemlíteni egy érdekes részletet. Éppen az előbb tekintettük át, hogy a természet erőhatásainak és hullámegyenleteinek formája és tulajdonságai milyen módon származnak a térbeli dimenziókból. A szuperszimmetrikus fonalelméletek speciális tulajdonságai a tér egyetlen dimenzióját sem tüntetik ki; ezek az elméletek a *téridő* egy adott dimenzióját választják ki. A gyakorlatban azonban mindig feltesszük, hogy csak egyetlen időbeli dimenzió létezik, mert egyébként szokatlan problémák merülhetnének fel az okság-gal kapcsolatban, és az energia nem lenne megmaradó mennyiség, mert a mozgástörvények többé nem lennének invariánsak az időbeli eltolással szemben (lásd 3. fejezet). Csak emiatt a feltételezés miatt gondoljuk azt, hogy a 10 vagy 26 dimenziós szuperstring-elméletek 9, illetve 25 térbeli dimenziót követelnek meg. E meggondolások újra eszünkbe vésik, hogy fizikailag az idő és a tér mennyire különbözik egymástól, annak ellenére, hogy a fizika matematikai elméleteiben e két mennyiség hasonló. A hasonlóság eredete az a mód, ahogyan az elméletek a térbeli és időbeli helyzetet az események megjelölésére használják azért, hogy egyértelmű megkülönböztetésüket elősegítsék.

Első látásra a „szuperstring"-ek bevezetése a pontok helyett furcsának hat, amikor tudjuk, hogy a gyorsítókban alkalmazott energiaszinteknél a részecskék a pontokhoz rendkívül hasonlóan viselkednek. A természet építőköveit

alkotó fonalaknak azonban a hőmérséklettől függő feszültségük van, a hőmérséklet csökkenésével a feszültség nő és a lineáris fonalat ponttá húzza össze. A fonalelképzelés igazi vonzóereje azonban az, hogy oly sokat nyerünk oly kevésből. Ha az anyag ismert elemi részecskéit pontszerűnek tekintjük, akkor egy nagy csoporttal állunk szemben – egyes fizikusok véleménye szerint zavarba ejtően naggyal. A különböző részecskék tulajdonságai mind eltérő magyarázatot igényelnek. Az egyedi fonalaknak azonban sok különböző energiaszintű rezgése van. A valóság fonalakon alapuló elképzelésének célja az, hogy a természet összes erőit és elemi részecskéit egyetlen fajta fonal különböző rezgési állapotainak tekintse. A legkisebb energiájú rezgések a leggyengébb erővel, a gravitációval kapcsolatosak, míg a nagyobb energiájú rezgések eredményezhetik a többi erő és részecske fellépését.



4.5 ábra. Nyitott és zárt szuperstringek

A fonalaknak kétféle változatuk van: nyitott és zárt. Mindkét változat lehet „irányítatlan" és „irányított". Az előbbi esetben a fonalakban terjedő hullámok a terjedés irányától függetlenül azonos formájúak lesznek, míg az irányított esetben tulajdonságaik különbözni fognak egymástól. Jelenleg úgy látszik, hogy a természeti erőhatások végső leírásának leglenyűgözőbb változata egy irányított zárt fonal, melyet az elképzelést bevezető négy princetoni fizikus (akiket manapság „princetoni vonósnégyesként" emlegetnek![*]) „heterotikus fonalnak" nevezett el.

A fonalak világosan meghatározott és intuitíve nyilvánvaló módon léphetnek egymással kölcsönhatásba. Egy nyitott fonal két másik nyitott fonallá törhet szét, lefűződhet róla egy gyűrű egy zárt és egy nyitott fonalat eredményezve, vagy egyszerűen bezárulhat, és így zárt fonallá alakulhat. Egy zárt fonal képes kettéhasadni két másik gyűrűvé. Végül két nyitott fonal keresztezheti egymást, majd újra szétválhat két eltérő, nyitott fonalra.

[*]Visszaadhatatlan szójáték, mely azon alapul, hogy a fonalnak megfelelő angol „string" szó a vonós hangszerek húrját is jelenti, a vonósnégyes angolul „string quartet". – *A ford.*

Az elemi részecskék fizikájában jelenleg ez az elképzelés áll a középpontban, és ez szolgáltatja a fizikusoknak a minden létező elmélete legelső meggyőző változatát. Csodálatos módon még az is előfordulhat, hogy a végtelen mennyiségeknek az elméletekből való kizárását előíró követelmény ezt az elméletet jelöli ki egyedül lehetségesként. Ez idáig nem találtak mellette vagy ellene szóló kísérleti tényeket. A jövendő években alapvető egyenleteinek félelmetes matematikai erődjeit beveszik majd, és ekkor bizonyosan lesznek előrejelzései. Csak ekkor tudjuk majd meg, hogy az általa adott egyedülálló leírás a minden létező elmélete-e, vagy pedig egyáltalán semmié sem.

A belső tér hitvallása

> Nem és nem! Csupán azt festetted le, ami van. Erre bárki képes. Az igazi rejtély azt lefesteni, ami nincs!
>
> Oscar Mandel

Mit láttunk az elemi részecskék világának rövid áttekintése során? A természet ott uralkodó törvényei pontosak és ősiek, de ezt nem vehetjük észre bonyolult mindennapi életünkben, ahol az egyszerű események sokaságának interferenciája elfedi az alapvető tulajdonságokat. Az elemi részecskék világában a szimmetria akár a megőrzött, akár a megsértett szimmetria a vezérfonal, azért, mert mély összefüggés van a természet törvényei és az általuk irányított létezők identitása között. Az elemi részecskék világában lezajló folyamatok törvényeinek kutatása megközelítésében platóninak látszik. A szimmetriákat rendszeresen feltárják abban a hitben, hogy a természet közülük a legátfogóbbat és legjobbat használja. A természet törvényeit annak felsorolására szűkítik le, hogy mit lehet megtenni a világban anélkül, hogy megfigyelhető tulajdonságait megváltoztatnánk. Ez a filozófia matematikai egyenletek rendszeréhez vezet, mely aztán maga „az elmélet". Sokszor azonban könnyebb egy elméletet megtalálni, mint alkotó egyenleteit megoldani. Bár maga az elmélet elegáns szimmetriát mutathat, ez nem feltétlenül nyilvánul meg az elmélet bármely *megoldásában*, és e megoldások azok, amelyek megmondják, hogy mit kell látnunk a természetben. Ismét kiderül, hogy a legmélyebben szántó logikai megfontolásokat fenntartják a színfalak mögött rejlő dolgok alapvető szabályainak megalkotására. A természet a szimmetriákat legmélyebben a törvények előírására használja, nem pedig egyedi dolgok formájának meghatározására. Alapjában véve ezek a szimmetriák mind biztosítékok arra, hogy a természet törvényei azonosak legyenek, függetlenül a megfigyelő mozgásállapotától és

egyéni látószögétől. Ez a nézet, melyet Einstein újító lángelméje követett, bizonyult a természet szimmetriái leggyümölcsözőbb értelmezésének. Ezenkívül valószínűleg jogosan gyaníthatjuk, hogy az elemi részecskék viselkedését leíró törvények jelen változataiban megnyilvánuló szimmetriák legalább néhány tulajdonságát képviselik az igazán alapvető törvényeknek, amelyeket még fel kell fedeznünk. Legrosszabb esetben az igazság töredék részét testesítik meg.

Az a sikeres feltevés, mely szerint a természet a lehető legnagyobb mértékben használ szimmetriákat, az eddig ismeretlen törvények formáját illetően kétféle álláspont kialakulásához vezetett. Egyrészt van egy „totalitárius" megközelítés, mely szerint mindennek, amit a szimmetria követelménye nem tilt meg, kötelezően a természettörvények részének kell lennie. Másrészt van egy „liberálisabb" filozófia is, mely szerint tiltva van minden, ami nem szükséges a szimmetria fenntartásához. Jelenleg csupán ízlés kérdése, hogy melyiket fogadjuk el vezérfonalként.

Fokozatosan bizonyítékokat találtunk arra, hogy a természet leghatékonyabb és legharmonikusabb matematikai törvényei azok, amelyeket háromnál több dimenzióra dolgozunk ki. Lehet, hogy az általunk tapasztalt világ csupán kis szelete egy magasabb dimenziókkal rendelkező univerzumnak, amely elképzelhetetlenül bonyolultabb annál, mint amit lehetségesnek gondoltunk. Az ehhez a következtetéshez vezető logika egy hittételből is fakad: a fizikusoknak a világegyetem *egységébe* vetett, szinte vallásos hitéből. Ez a hit ösztökéli a tudósokat a természet összes erőit és részecskéit egyesítő elméletek kutatására. Nem kérdőjelezik meg, hogy létezik ilyen elmélet, annak ellenére, hogy elképzelhető két versengő törvényrendszer is, melyek a világegyetem különböző részeit uralnák, és egymással vetélkedve kölcsönhatásban állnának, hasonlóan ahhoz, mint ahogyan két élő szervezet teszi. A szimmetriák használatába vetett kitartó hit, és a lehető legkisebb számú alkotóelemből felépült egyesített leírás keresése azok a tényezők, amelyek a természeti törvények alakjára vonatkozó elméletek kifejlesztését az elemi részecskék fizikájának területén irányítják. S ezen a területen, a kísérleti bizonyítékok megszerzése meghaladja a jelenleg elvégezhető kísérletek lehetőségeit. Bizony könnyen előfordulhat, hogy a „minden létező elmélete", ha egyáltalán létezik ilyen, az elméletek megfigyeléssel való igazolására szolgáló eszközeink és képességeink határán kívül esik. Felfedezhetnénk, hogy egy gyönyörű matematikai elmélet egyedülálló tulajdonságokkal rendelkezik, melyek képessé teszik az összes neki feltett elvi kérdés megoldására. Nem volnának ismert hibái vagy következetlenségei – akár a *valóban* helyes elmélet is lehetne. Nincs azonban semmiféle ok, ami miatt olyannak kellene lennie, hogy képesek legyünk igazolni vagy a vetélytárs elméleteket megdönteni. Nincs semmi ok arra, hogy a

világegyetem felépítésének olyannak kell lennie, ami lehetővé teszi az ember számára alapvető törvényeinek felfedezését. Ha szerencsénk van, esetleg módot találhatunk arra, hogy a természet alapvető törvényeinek matematikai leírását részlegesen ellenőrizzük, de ugyanúgy kiderülhet az is, hogy meghatározó tulajdonságaikat csak végtelen nagy hőmérsékletű és energiájú környezetben mutatják meg, melyet soha nem tudunk létrehozni.

Rövid találkozásunk a belső tér törvényszerűségeinek kutatásával megmutatta, hogy a természet törvényei és az általuk irányított dolgok mennyire távol esnek attól, amit a világról gondolunk és benne látunk. Newton a tudósok nemzedékeinek egész sorát vette rá arra, hogy a világot hatalmas óraszerkezetnek tekintsék, a mai részecskefizika azonban felfedi, hogy a világ folyamatosan változó mintázatok kaleidoszkópja. Mi azonban még mindig azon tűnődünk, hogy milyen közel sikerült jutnunk ahhoz az alapvető szinthez, ahol a természet törvényei hatásukat kifejtik.

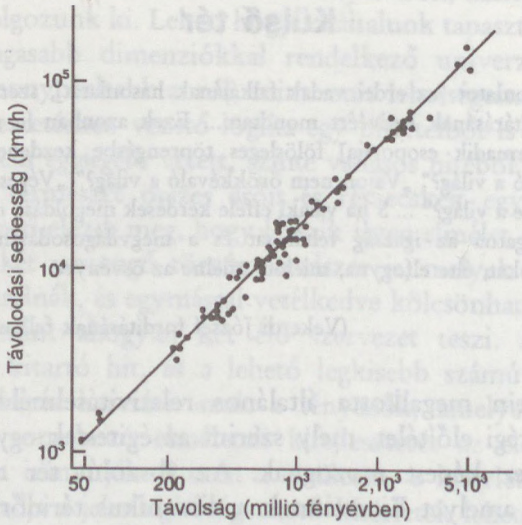
Külső tér

> Ezt a hasonlatot [az erdei vadak falkájának hasonlatát], szerzetesek, az igazság feltárásának kedvéért mondtam... Ezek azonban [a remeték és papok harmadik csoportja] fölösleges töprengésbe kezdenek: „Vajon örökkévaló a világ?" „Vajon nem örökkévaló a világ?" „Véges-e a világ?" „Végtelen-e a világ?" ... S ha valaki efféle kérdések megoldása miatt egyre csak halogatná az igazság feltárását és a megvilágosodásához vezető gyakorlatokat, élte elfogyna, mielőtt rálelne az ösvényre.
>
> Buddha
> (Vekerdi József fordításának felhasználásával)

Mielőtt Einstein megalkotta általános relativitáselméletét, hosszú ideig hatott egy réges-régi előítélet, mely szerint az égitestek egy abszolút módon rögzített háttérhez képest mozognak. Az abszolút tér rögzített voltának elmélete volt az, amelyet Einsteinnek a dinamikus téridőről alkotott elképzelése megdöntött. Az új elmélet lehetővé tette Alexander Friedmann szovjet meteorológus számára, hogy megjósolja: az egész világegyetem – minden, ami létezik – a dinamikus változás állapotában van. Hét évvel később Edwin Hubble amerikai csillagász igazolta ezt az állítást. Felfedezte, hogy a távoli galaktikák csillagaiból hozzánk érkező fény szabályos módon eltolódik a spektrum vörös vége felé, a fénykibocsátó galaxis távolságával egyenesen arányos mértékben. E „vöröseltolódásnak", ahogyan ismertté vált, van egy egyszerű magyarázata, a „Doppler-eltolódás", amelyet a galaxisok tőlünk való

távolodása okoz. A Doppler-effektusnak ismert példája a száguldó vonat. Ha a sínek mellett állunk, és a vonat kürtjének hangját hallgatjuk, az először magasabb lesz, ahogyan a vonat közeledik, majd hirtelen megváltozik, és alacsonyabb lesz, amint a vonat elhalad mellettünk, és a távolba tart. Amíg a vonat közeledik, a hanghullámok fülünket a kibocsátás frekvenciájánál gyorsabb ütemben érik el, amikor pedig a vonat távolodik, észlelésük frekvenciája a fülünkhöz érve alcsonyabb lesz, mint a kibocsátás frekvenciája a kürtnél. A vonat elhaladásakor bekövetkező hangmagasság-változás mérésével a vonat sebessége meghatározható (a rendőrök radaros sebességmérése szintén ezen az elven alapul).

Mikor Hubble a távoli galaxisok fényében észlelt vöröseltolódások magyarázatához szükséges távolodási sebességeket a galaxisok fényesség alapján megmért távolságának függvényében ábrázolta, a 4.6 ábrán látható szabályos összefüggést kapta (bár megfigyelései csak 50 millió fényév távolságra terjedtek ki).



4.6 ábra. Hubble összefüggése, amely azt mutatja, hogy a távoli fényforrások távolodási sebessége nő távolságuk növekedtével

A táguló világegyetem gondolata bonyolult elképzelés, amely számos fogalmi zavart okoz. A tágulást többnyire úgy képzeljük el, mintha volna *térbeli* középpontja, és fokozatosan terjedne a térben, ebből a középpontból, éppúgy, mint egy robbanás. Egy ilyenfajta táguló lökéshullámnak kell hogy legyen legkülső felülete, s ezért azt kérdezzük, mi van ezen túl: a világegyetem

eddig fel nem fedezett részei, a pokol tornáca, vagy mi a csuda? Valójában a tágulóvilágegyetem ilyetén elképzelése hibás. A Hubble által felfedezett és a görbült téridő einsteini leírása révén értelmezett tágulás magának a *térnek* a tágulása, nem pedig a *térben* végbemenő robbanás. E tágulásnak nincs elérhető középpontja, nincs határfelülete, és nem létezik a „tovább", ahová a világegyetem tágulna. Háromdimenziós képzeletünk nem teszi lehetővé ennek szemléltetését, de lényegét elképzelhetjük, ha a saját dimenzióinkban elhelyezkedő kétdimenziós világban gondolkodunk. Ezt a világot egy táguló léggömb görbült felszíne képviseli. Ha megjelölünk egy sor, egymástól azonos távolságra lévő pontot a léggömb felszínén, akkor amint a léggömb felfúvódik, a kétdimenziós világ tágul, mégpedig olyan értelemben, hogy minden pont minden más ponttól távolodik a léggömb felszínén. Ha ezt bármelyik pontból szemlélnénk, azt látnánk, hogy minden más pont távolodik *tőlünk*, mintha mi lennénk a tágulás középpontja, *függetlenül attól, hogy melyik pontból végezzük a megfigyelést*. Felismerjük, hogy ez a szokatlan helyzet azért jön létre, mert a tágulás középpontja nem a léggömb felszínén fekszik. Továbbá a léggömb kétdimenziós világot alkotó felszínének megvan az a szokatlan tulajdonsága, hogy korlátozott méretű (a gömb felszíne $4\pi r^2$, ahol r a gömb sugara), de nincs határa. Ha végtelen sokáig mozognánk is a léggömb felszínén, akkor sem találnánk a szélét. A világegyetem tágulása a végtelenségig folytatódhat, mely esetben a léggömb a végtelenségig fúvódik fel (tekintsünk el attól a ténytől, hogy ha gumiból lenne, előbb-utóbb kipukkadna!), vagy a tágulás lelassulhat és összehúzódássá válhat, mintha a léggömböt leeresztenénk.

Az *Annie Hall* c. filmben Woody Allent már a táguló világegyetem puszta gondolata is a pszichoanalitikus orvos díványára fekteti. Legnagyobb problémája az a meggyőződése, hogy amennyiben minden tágul, akkor Amerikának, Brooklynnak, és igazából saját magának is tágulnia kell. Szerencsére ez nem így van. A világegyetem tágulása során azok a tárgyak tudnak egymáshoz képest szabadon elmozdulni, melyeket nem tart össze a természet valamely hatalmas erőhatása. A léggömb esetében a felszínét alkotó gumi atomjai nem tágulnak. Megtartják állandó méretüket, mert rövid távon ható kémiai és atomi erők tartják őket össze, melyek sokkal erősebbek, mint a táguló gumira ható légnyomás. A valódi világegyetemben a tágulást jelző valamik a nagy galaxishalmazok. Kisebb méretű objektumok, mint a galaxisok és a csillagok saját maguk nem tágulnak: csupán magukkal ragadja őket a tágulás folyamata.

A kozmológia egyedülálló volta

> A fizikai törvény fogalma éppen azt teszi lehetővé, hogy a vizsgált rendszert úgy kezeljük, mint egyikét a számos hasonlónak. A világegyetem azonban egyedülálló, így a fizikai törvények eme jellegzetessége, úgy látszik, teljesen értelmét veszti, amint a világegyetemre próbáljuk alkalmazni.
>
> W. H. McCrea

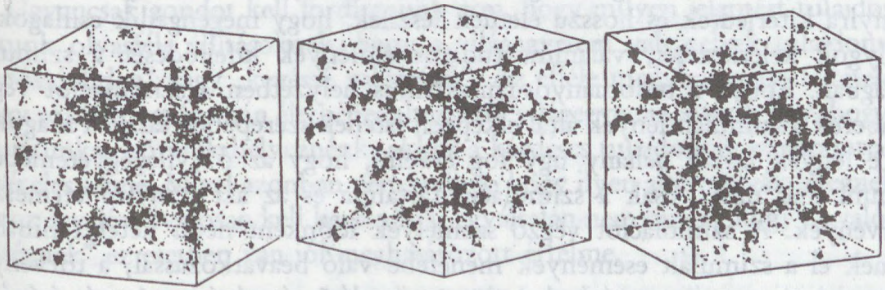
A kozmológia a tudásra való végső törekvés, a világegyetemnek mint egésznek a tanulmányozása; beleértve méretét, korát, alakját, redőit, eredetét és tartalmát. Ez az emberiség legrégebbi kutatási területe, de csak a XX. században került át a metafizika birodalmából a fizika fennhatósága alá, ahol az elmélkedés nincsen szabadjára engedve, és az eszméknek ki kell állniuk a megfigyelésekkel való szembesítés próbáját. És mégis, a kozmológiának – annak ellenére, hogy földhözragadtabb tudományok módszertanát vette át – számos meglehetősen egyedülálló vonása van, melyeknek tudatában kell lennünk, amikor a világegyetemnek *mint egésznek* a viselkedését irányítani látszó törvényeket próbáljuk meg feltárni. Ha vannak ilyen törvények, akkor ez valami alapvetően fontosat jelez – a világegyetem külső anyagi megjelenésén túlmutató logika létezését. Vizsgáljuk meg ennek tudatában a kozmológia mint tudomány néhány egyedülálló vonását, melyek a természeti törvények minden más stúdiumától elkülönítik.

A földi tudományokban megfigyeléseken nyugvó adatok bőségével állunk szemben, és a jövőben még többet gyűjthetünk össze belőlük. Ami gyakorta hiányzik, az egy érett, átfogó elmélet, amely képes az összes rendelkezésre álló információt magába foglalni, értelmezni és egymással összefüggésbe hozni. A tények elképesztő halmaza, mellyel egy elméleti próbálkozást egyeztetni kell, szinte lehetetlenné teszi, hogy egy ígéretes elméleti építmény túljusson a tervezés fázisán, hiszen annyira sok dologgal kapcsolatban kell egyidejűleg helyesnek bizonyulnia. A kozmológiában fordított a helyzet. Kevés az adat, megszerzésük nehéz, és nehezen értelmezhetők. Nem végezhetünk tetszés szerinti megfigyeléseket, el kell fogadnunk a világegyetem által jelenleg felkínált tényeket. Ugyanakkor Einstein általános relativitáselmélete hatékony eszközünk a látott dolgok értelmezésére.

A világegyetemmel nem tudunk kísérletezni, csak megfigyelhetjük. De azért van két lehetőségünk arra, hogy megtartsuk a természet vizsgálatának hagyományos módszerét, vagyis az elméleti előrejelzések ellenőrzését a tényekkel való szembesítés révén. Elméletünk esetleg azt jósolja, hogy a legnagyobb

tömeggel rendelkező galaxisok a legfényesebbek. Az elképzelést a megfigyelt galaxisok tömege és fényessége közti összefüggés megvizsgálásával ellenőrizhetjük, hogy megállapítsuk, vajon tényleg van-e olyan összefüggés, mely szerint a tömeg és a fényesség arányosan növekszik.

A gyakorlatban a dolgok ritkán ilyen egyszerűek. Az összefüggés ellenőrzésekor az adatok általában az egyenes arányosság körül szóródnak. Előadódhatnak az adatokat eltorzító, ismert és ismeretlen eredetű kísérleti hibák. Végül is az összefüggést statisztikailag kell kiértékelni, és csak annyit mondhatunk, hogy az összefüggés bizonyos valószínűséggel áll fenn. Ez a statisztikai jelleg persze nem kizárólag a kozmológia betegsége. Az összes ismételhető kísérletet gyötri.



4.7 ábra. N-test szimuláció. Gyors számítógépek segítségével a kozmológusok szimulálni tudják a gravitáció hatását tömegek tízezreinek mozgására. Ezeket a tömegeket születőben lévő galaxisoknak tekintik. A számítógép 32 000 véletlenszerűen elhelyezett tömeg gravitációs kölcsönhatását követi a táguló világegyetem egyik matematikai modelljében. Az ábra a tömegek csoportosulási mintázatának három ortogonális képét mutatja az egyik kísérletből, melyet Marc Davis, George Efstathiou, Carlos Frenk és Simon White hajtottak végre. A számítógép tárolja minden egyes tömeg mozgásának irányát és sebességét, valamint helyzetüket bármely adott pillanatban, és ezeket az adatokat a gravitáció törvényeivel együtt arra használja fel, hogy ezek miképpen fognak változni az időben. A szimuláció eredményeit összehasonlíthatjuk a galaxisok mozgásával és csoportosulásával a valódi világegyetemben, hogy ily módon ellenőrizzük a kiindulási mintázatokra és a csoportosulás módjára vonatkozó kezdeti feltételezéseket

Az utóbbi években kialakult egy új eszköz: számítógépes szimulációkat végezhetünk a világegyetem egyes vonásainak evolúciójával kapcsolatban. Követhetjük például egy nagyszámú tömegből álló (mindegyik egy-egy galaxist képvisel), egyszerűsített világegyetem fejlődését a gravitáció hatása alatt, hogy összehasonlítsuk az egyes kezdeti eloszlásokból létrejövő részletes csoportosulási mintázatokat azzal, amit ma az égen látunk. Így a lehetséges múltbeli

állapotok következményeit ellenőrizhetjük az észlelt adatokkal való összevetés révén. Egy efféle numerikus szimuláció jellegzetes eredményét szemlélteti a 4.7 ábra. Jelenleg a szimuláció kiterjedését a számítógépek sebessége korlátozza. A legátfogóbb szimulációk mintegy 32 000 tömeg egymásra gyakorolt gravitációs kölcsönhatását követik – mindegyik tömeget egy galaxisnak tekintik. Ezt az egész látható világegyetemben észlelt galaxisok 10^{11}-es számával kell összevetni. A két szám óriási különbsége ellenére az egyes szimulációkat statisztikai szempontból valószínűleg a világegyetem „reprezentatív mintájának" kell tekintenünk, a gravitációs hatások egyfajta kozmikus közvélemény-kutatásának.

Szórakoztató dolog eltűnődni a világegyetem kiterjedtebb és jobb numerikus szimulációinak végső logikai következményéről. Bizonyos idő után annyira kiterjedtek és hosszú életűek lesznek, hogy megengedik csillagok és bolygók keletkezését, valamint tudatos élőlények kifejlődését a szimulált világban. Ebben a tudományos-fantasztikus helyzetben a szimulációt végző emberek a szimulált lények által elképzelt istenek szerepében találják magukat, és e lények közül néhány úgy fog érvelni, hogy az ő „világegyetemében" semmi más nincs, csak a szimuláció tartalma és az azt irányító természeti törvények. A szimulációt végző személyek időnként némi kételyt hinthetnének el a szimulált események menetébe való beavatkozással, a törvények esetenkénti megváltoztatásával, különös „csodát" végrehajtva. A számítógépes szakember és a numerikus szimuláció e képe érdekes párhuzama a világegyetem és az azt felügyelő Isten kapcsolatának, de ezt a párhuzamot, úgy látszik, nem követték végig azok a teológusok, akik rokonszenveznek egy efféle elképzeléssel!

a) A világegyetem egyedülálló

A világegyetem egyedülálló voltának kijelentése lényegében tautológia, mely alapvető nehézséget okoz a tudományos módszertan alkalmazásában. Hozzászoktunk ahhoz, hogy ismételt megfigyeléseket végzünk és általános elveket alkalmazunk olyan egyedi események viselkedésének kategorizálására, melyek valamilyen lényeges közös elemet tartalmaznak. A világegyetem mint egész ilyenfajta séma szerinti tanulmányozásának lehetetlen volta figyelmeztet minket arra, hogy lehetséges, sőt valószínű, hogy mélyebb szerkezetének és belső logikájának felderítésében néhány fölöttébb sajátos meggondolás fog szerepelni. Nem szükségszerű, hogy ezek az elvek ugyanazt a szerepet játsszák a világegyetemen belüli egyes események megértésében. Ha léteznek ugyan a világegyetem viselkedését irányító törvények, de semmilyen módon nem

alkalmazhatók a világegyetemen belüli dolgok viselkedésére, akkor lokálisan végzett megfigyelések nem tárhatják fel e törvényeket.

A tudományos módszertan más módon is támaszkodik az ismételt megfigyelésekre. Amikor egy fizikai jelenséggel találkozunk, azt látjuk, hogy az a természeti törvények által megszabott, valamint véletlenszerű elemek összekapcsolódása. A tudomány e két elemcsoport elkülönítésével halad előre. Az, hogy egy piros színű golyót egy bizonyos módon látunk esni a gravitáció hatására, *a priori* részben a golyó piros színének következménye is lehetne.* Egyedül úgy győződhetünk meg arról, hogy ez nem így van, hogy megvizsgáljuk különböző színű, de egyébként minden tekintetben azonos golyók leesését. A világegyetem viszonylatában ez a lehetőségünk nincs meg, így nagyon nehéz alapvető tulajdonságait elkülöníteni a véletlenszerűektől.

Ugyancsak gondot kell fordítanunk arra, hogy milyen jelentést tulajdoníthatunk olyasféle állításoknak, hogy a világegyetem valamelyik tulajdonsága „valószínűtlen" vagy „kevéssé valószínű". Az efféle nyelvhasználat feltételezi, hogy sokféle, egyformán életképes alternatív világegyetem létezik úgy, hogy ha a sajátunkat közéjük helyeznénk, akkor a kérdéses tulajdonság szempontjából kivételes lenne. Mivel azonban nem tudjuk, hogy ilyen alternatívák léteznek-e, ezt az érvelést óvatosan kell kezelnünk: egyáltalán nem biztos, hogy a „valószínűségnek" ez esetben van jól meghatározott értelme.

b) A „világegyetem" és a „látható világegyetem"

A látható világegyetem tágulásának megfigyelése azt mutatja, hogy az mintegy 15 milliárd évvel ezelőtt „kezdődött". Ez alatt az idő alatt a fény nem tehetett meg 15 milliárd fényévnél nagyobb távolságot, így az e „horizonton" túl lévő események még nem léteztek elég ideig ahhoz, hogy észlelhessük őket. A világegyetem minden megfigyelőjét egy körülbelül 15 milliárd fényév átmérőjű érzékelési gömb veszi körül, amely számukra meghatározza a *látható világegyetemet.* Az idő múlásával minden megfigyelő látható világegyeteme folyamatosan növekszik. Saját látható világegyetemünk kijelöli az univerzum ama részének határát, melyet észlelhetünk, illetve amely bármiféle oksági

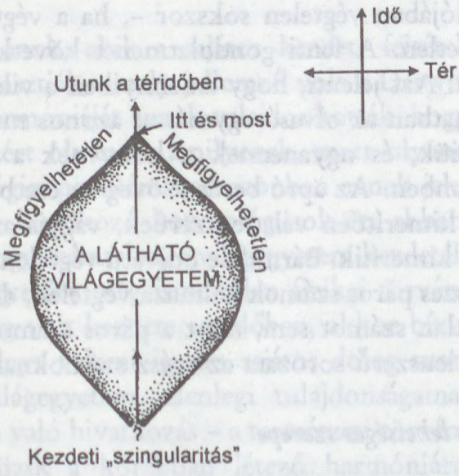
*A közös elemek elkülönítésének eme módszere nem biztos, hogy csalhatatlan. Tegyük fel, hogy valaki kísérleteket akar végezni annak megállapítására, hogy mennyi alkoholt fogyaszthat anélkül, hogy teljesen berúgna. Az első este elfogyaszt tíz gint tonikkal, és eszméletét veszti, mielőtt haza tudna menni. Második este megiszik tíz whiskyt tonikkal, és összesik, mielőtt hazaérne. A harmadik alkalommal ugyanerre a sorsra jut, miután felhajtott tíz vodkát tonikkal. A közös elemet elkülönítve arra a következtetésre jut, hogy a jövőben annak érdekében, hogy józan maradjon, egyszerűen nem szabad tonikot innia.

kapcsolatban állhat velünk. Létfontosságú az a megkülönböztetés, amelyet a látható világegyetem és az *igazi* univerzum között kell tennünk. A megfigyeléseken alapuló tudomány csak a látható világegyetemet ismeri. E korlátozott méretű terület tanulmányozása az, ami természeti törvényeinkhez vezet, és csak az erre a területre vonatkozó elméleti előrejelzéseinket tudjuk, akár csak elvileg is, megfigyelésekkel megerősíteni vagy elvetni. Ugyanakkor a világegyetemről mint egészről lényegében semmit sem tudunk. Lehet, hogy végtelen kiterjedésű, mely esetben a véges méretű, látható világegyetem annak mindig csak végtelenül kicsiny, esetleg az egészet nem is reprezentáló része lesz. Ha a világegyetem egésze véges, akkor valamivel jobb helyzetben vagyunk: megfigyeléseink legalább az egésznek egy meghatározott hányadára vonatkoznak, s így némiképpen több okunk van reprezentatívnak tekinteni őket.

A világegyetem és a látható világegyetem közti megkülönböztetést a kozmológiai vizsgálatok beszámolóiban gyakran elmossák. A gyakorlatban a kozmológusok egy, az „alapelv" rangjára emelt feltételezést hívnak segítségül, hogy elkerülhessék a fenti megkülönböztetés állandó emlegetését. A „kozmológia alapelvét" különbözőképpen fogalmazzák meg. Egyes változatok szerint a világegyetem „átlagosan" mindenütt egyforma; más változatok állításai közvetettebbek, és csak azt a kopernikuszi elvet fejtik ki, hogy a világegyetemben nincsenek kitüntetett helyek. Mindezen állítások célja az, hogy alátámasszák azt a feltételezést, hogy a világegyetem általános tulajdonságai mindenhol ugyanolyanok. Így azután, ha azt találjuk, hogy a látható világegyetemben a galaxisok sűrűsége mindenhol ugyanakkora, akármerre nézünk is, akkor a fenti feltételezés megengedi számunkra, hogy jó lelkiismerettel tekintsük ezt az egész világegyetem tulajdonságának. Szigorúan véve ez persze bizonyíthatatlan feltételezés, hacsak nem tudjuk kimutatni, hogy az észlelési horizontunkon túl lévő világegyetem szerkezetének megfigyelhető következményei vannak a lokális szerkezetet illetően. A kozmológia alapelve látszólag csak a látható világegyetem tartalmáról állít valamit, kimondatlanul azonban a természeti törvényekre is vonatkozik. Feltételezzük, hogy a lokális eseményeket megfigyeléseink szerint irányító törvények érvényesek az egész világegyetemben. Nem olyan feltevés ez, melyet észlelési horizontunkon túl ellenőrizhetnénk, de a következő fejezetekben látni fogjuk: néhány komoly bizonyítékot tudunk felhozni arra, hogy a Földön érvényes természeti törvények nem különböznek a milliárd fényévekre lévő csillagászati objektumok szerkezetét meghatározó törvényektől.

A világegyetem észlelhető részének végességével kapcsolatban komolyan veendő probléma, hogy a világegyetem e látható része esetleg nem tartalmaz elegendő információt a természeti törvények kikövetkeztetésére. Egyes dara-

bok szükségszerűen hiányoznak kozmikus kirakójátékunkból. Nem tudjuk, hány hiányzó darab van, és azt sem, hogy mennyire fontos szerepet játszanak a teljes kép kialakításában. Messze járunk annak kiderítésétől, hogy a világegyetem a természeti törvények működéséből következő „dolog"-e, vagy bizonyos értelemben egyenértékű azokkal a törvényekkel, amelyek irányítják, vagy egyáltalán nem magyarázható meg a természeti törvények fogalmi rendszerén belül. Úgy látszik, hogy ezt a megkülönböztetést nem értékelték kellőképpen azok a kozmológusok, akik olyan fizikai mechanizmusokat keresnek, melyek révén a táguló világegyetem a semmiből keletkezhet. Még ha sikerülne is, egy efféle próbálkozásnak még mindig meg kellene magyaráznia, hogyan jöttek létre természeti törvények a világegyetem keletkezésének pillanatában. A végső kozmológiai rejtély látszólag az a kérdés, hogy milyen módon és mikor keletkeztek a természeti törvények, ha úgy képzeljük, hogy a tér és idő világegyeteme magától jött létre a semmiből.



4.8 ábra. A világegyetem velünk oksági kapcsolatban álló részét mutató téridődiagram. Csak ez a rész hozzáférhető közvetlen megfigyeléseink számára. Eme „látható világegyetem" mérete egyre növekszik, ahogy a világegyetem tágul. A múltba visszafelé menve a minket a jelenben elérni képes fénysugarak útvonalait a gravitáció fényre gyakorolt hatása egy végtelen sűrűségű látszólagos szingularitás felé fókuszálja

c) Nem lokális hatások

Hozzászoktunk a „helyi jellegű" természeti törvényekhez. Azzal a tulajdonsággal rendelkeznek, hogy a testek közötti, nagy távolságokon át ható kölcsönhatás

nem pillanatszerűen, hanem helyileg, egy mélyebben rejlő erőtér közvetítésével történik. Klasszikus példája ennek Einstein görbült térideje, melyben a testek mozgását az őket körülvevő téridő helyi görbülete szabja meg. Nem biztos azonban, hogy a világegyetem a legnagyobb kozmológiai dimenziókban is ilyen. Létezhetnek nagy hatótávolságú erők, sőt új természeti erőhatások is, melyek a testek távolságának növekedésével erősödnek, s így túlságosan gyengék ahhoz, hogy a Föld vagy a Naprendszer léptékének megfelelő távolságokon megmutatkozzanak, ám uralják a világegyetem nagy léptékű tágulását. Einstein általános relativitáselmélete megengedi ilyen erő létezését, mely a testek közti távolsággal arányosan növekedne, de nem függene tömegüktől vagy identitásuktól.

Láttuk, hogy a kvantumvalóság megköveteli olyan nem lokális elemek létezését, melyek megengedik hatások fellépését pillanatszerűen, vagy a szokásos módon értelmezett okok hiányában. Nem tudjuk, hogy ennek van-e bármiféle kozmológiai jelentősége.

Igen érdekes nem lokális probléma merül fel abban az esetben, ha világegyetemünk végtelen. Egy végtelen világegyetemben bármi, ami *megtörténhet*, meg is fog történni – valójában végtelen sokszor –, ha a végtelen világ véletlenszerűsége kimeríthetetlen. A fenti gondolatmenet következményei meglehetősen nyugtalanítóak. Azt jelenti, hogy amennyiben a világegyetem végtelen, akkor ebben a pillanatban az olvasó egymással azonos másolatainak végtelen számban kell létezniük, és ugyanennek a könyvnek a másolatait olvassák valahol a világegyetemben. Az apró betűs szöveg ez esetben annak felel meg, hogy az események kimerítően véletlenszerűek, vagyis az összes lehetőséget véletlenszerű módon kimerítik. Bármiféle ódivatú végtelenséggel nem érhetjük be. Így például az összes páros számok halmaza végtelen, de soha nem találunk benne egyetlen páratlan számot sem, mert a páros számok végtelen halmaza nem *kimerítően* véletlenszerű sorozata az egész számoknak.

d) A kezdeti feltételek lehetséges szerepe

Amikor a világegyetem szerkezetét megfigyeljük, olyan egyedi jelenségek látványával kerülünk szembe, melyek annak eredményeként alakultak ki, hogy egyrészt a világegyetem egy meghatározott *múltbeli* állapotban volt, másrészt természeti törvények irányították, melyek meghatározták, hogyan változik ez az állapot az idő függvényében. Vegyünk egy tényleges példát: a galaxisokat. Nem tudjuk, hogy miért léteznek a galaxisok ennyire különböző formákban. Lehetséges, hogy ezek az óriási, a környező világegyetemnél milliószor sűrűbb csillagszigetek létezésüket és sajátos formájukat elsődlegesen azoknak a körülményeknek köszönhetik, amelyek a világegyetem tágulásának kezdetekor (sőt,

talán keletkezésekor) álltak fenn. Az is lehet, hogy e tulajdonságok elsősorban a galaxisokat alkotó csillagok és a csillagközi por mozgását meghatározó gravitációs törvények formája és korlátozásai miatt alakultak ki. A törvények és a kezdeti feltételek eme kettőssége és ellentéte nem jelentkezik, amikor a természeti törvények hatását a laboratóriumban tanulmányozzuk. Ilyen körülmények közepette a kísérlet felépítését úgy szabályozhatjuk, hogy világosan látható legyen, mi a kezdeti feltételek hatása a kísérlet végeredményére.

A kozmológiai megközelítés hagyományosan két utat követett a világegyetem számos nagy léptékű tulajdonságának magyarázatára. Az egyik a világegyetem jelenlegi állapotát elsődlegesen a sajátos kezdeti feltételek eredményének tekintette, a másik annak kimutatására törekedett, hogy a világegyetem – függetlenül attól, hogyan keletkezett – 15 milliárd évnyi tágulás után elkerülhetetlenül a ma megfigyelhető általános tulajdonságokat venné fel. Mindkét elképzelés mellett lehet érvelni, de eközben ügyelnünk kell arra, hogy az egyik vagy másik módszertani elvvel való megegyezést ne tévesszünk össze az igazsággal.

Első ránézésre azok, akik a sajátos kezdeti feltételekre hivatkoznak, a kényelmes utat választják, amely jellemző volt a Darwin előtti biológusokra, akik a természet harmóniáját annak tulajdonították, hogy „éppen így csinálták meg"; a dolgok azért olyanok, amilyenek, mert olyanok voltak, amilyenek voltak. A kozmológiai problémában azonban ennek jelentése némileg más. A kezdeti feltételekre hivatkozó kozmológusok ezt abban a szilárd meggyőződésükben teszik, hogy számtalan, a világegyetem kezdetéhez közeli eseményekkel kapcsolatos, egyelőre még ismeretlen fizikai törvény létezik. Ha a világegyetemnek tényleg volt kezdete az időben, akkor bízvást fogadhatunk arra, hogy ezt az eseményt valami igazán sajátos dolog szorította korlátok közé. Éppen ezért a világegyetem jelenlegi tulajdonságainak magyarázatában a kezdeti feltételekre való hivatkozás – a természeti törvényekre való hivatkozás helyett – különbözik a korábban létező harmóniára való hivatkozástól, mondjuk annak magyarázatára, hogy miért álcázzák magukat az állatok olyan jól környezetükben. A gyakorló kozmológus számára ennek az elképzelésnek az a hátránya, hogy a világegyetem kezdeti állapotát irányító törvények felfedezése valószínűleg a legnehezebb az összes közül. Megkövetelné annak helyes megértését, hogy a kvantumelmélet és az általános relativitáselmélet hogyan egyesülnek a kvantumgravitáció törvényeinek létrehozására. S ami még rosszabb, e kezdeti törvényeket csak a világegyetem jelenlegi szerkezetének megfigyelésével lehetne kikövetkeztetni és ellenőrizni, vagyis annak megfigyelésével, amit eredetileg meg akartunk magyarázni. Az ellentétes megközelítést,

amely azt próbálja kimutatni, hogy a világegyetem jelenlegi szerkezete a természeti törvények elkerülhetetlen következménye (függetlenül a nagy ősrobbanáskor fennálló szigorú feltételektől), gyakran „kaotikus kozmológiának" nevezik. Azért, mert célja annak kimutatása, hogy ha a világegyetem egy tetszőleges, kaotikus állapotból indulna is ki, elkerülhetetlenül a tágulás ma észlelt nyugodt, rendezett állapotába jutna. Ha ez így volna, az egyfajta módszertani nézőpontból előnyös lenne: hiszen borúlátók is lehetnénk, és vélekedhetnénk úgy, hogy soha nem fogjuk megtudni, mi történt a világegyetem kezdetekor, és ekkor bármilyen magyarázat vonzó, amely megmondja – *függetlenül attól, hogyan kezdődött a világegyetem* –, hogy miért ilyen jelenlegi szerkezete. Másrészt ennek az a kiábrándító következménye is megvan, hogy ha a jelenlegi szerkezet független a világegyetem keletkezésének módjától, akkor semmiféle jelenlegi megfigyelés nem fog fényt deríteni a legrendkívülibb problémára, a világegyetem eredetére. És persze emlékeznünk kell arra, hogy a világegyetemnek – még eddig látott kis részének is – esetleg nem volt időbeli kezdete, s ez esetben még kevésbé valószínű, hogy meggyőző válasz volna adható arra a kérdésre, hogy „miért" létezik jelenlegi formájában.

Ha a világegyetem időbeli fejlődését determinisztikus matematikai egyenletek írják le, mégpedig úgy, hogy a jövőt teljesen és egyértelműen meghatározza a múlt, akkor a világegyetem jelenlegi szerkezete kizárólag egy adott kezdeti feltételcsoport eredményének bizonyul.

e) Kiválasztási hatások

Mivel a világegyetemet nem tudjuk tetszés szerint befolyásolni, szembesülünk a csillagászati megfigyeléseinket befolyásoló torzítások kiküszöbölésének kínzó problémájával. A bizonyítékok egyes fajtáit könnyebb megszerezni, mint másokat; az erősebb belső fényességű galaxisokat könnyebben észrevesszük, mint a halványabbakat, és ennélfogva számuknál nagyobb arányban lesznek képviselve a galaktikus populációban. S ez éppen az a fajta „mintavételi" probléma, amelyre a közvélemény-kutatóknak ügyelniük kell. Tegyük fel, hogy telefonos közvélemény-kutatást hajtunk végre az ország egyik szegényebb területén, a jövedelmek felmérése céljából. A mintavételi stratégia azonnal kizárja azokat a háztartásokat, amelyek nem engedhetik meg maguknak, hogy telefonjuk legyen. A felmérés eltorzult. Az eredmények ugyanannyit mondanak a mintavétel torzulásáról, mint a felmérés szándékolt tárgyáról.

Több ezer éven át az égboltot a ma „látható hullámsávnak" nevezett tartományba eső fény észlelése útján figyeltük meg, amely a vöröstől az ibolyáig

terjed abban a spektrumban, amelyre az emberi szem és a közönséges, tükröket és lencséket alkalmazó távcsövek érzékenyek. A fenti vékony sávon kívül eső fény vagy olyan nagy energiájú, hogy megsemmisítené az emberi szem fényérzékeny rodopszinmolekuláit, vagy annyira kis energiát hordoz, hogy egyáltalán nem képes bennük ingert kiváltani. Az utóbbi harminc évben fokozatosan, több és másfajta fényt is elkezdtünk felhasználni a világegyetem észlelésére – röntgensugarakat, rádióhullámokat, infravörös és ultraibolya fényt –, mindegyik eltérő, más és más tulajdonságot kiemelő képet ad a világegyetemről. Ha röntgenszemünk lenne, az elmúlt századokban a világegyetem megjelenéséről és mibenlétéről a maitól meglehetősen eltérő asztrológiai és csillagászati hagyományokat alakítottunk volna ki. Tudjuk, hogy vannak más módszerek a világegyetem vizsgálatára – neutrinókra vagy gravitonokra érzékeny detektorok alkalmazása –, melyek a világegyetem újabb egyedi képeit szolgáltatnák, de technológiánknak még el kell jutnia odáig, hogy a világegyetem vizsgálatára e módszereket alkalmazhassuk.

Földközelibb tudományokban az ilyen típusú torzításokat könnyebb kezelni a kísérletek és megfigyelések megismétlésével a környezet bizonyos tényezőinek egyidejű megváltoztatása mellett, így azonosíthatók a torzítások és hatásuk. A kozmológiában ez csak ritkán lehetséges. Sőt, vannak nagy horderejű torzítások, melyek elkerülhetetlenek. Ezeket az a tény okozza, hogy a hozzánk hasonló megfigyelők – gyengén összekötött molekulákból álló, törékeny lények – létezéséhez meglehetősen sajátos hőmérsékleti és gravitációs viszonyok szükségesek. Megfigyeléseinket szükségszerűen eltorzítja, hogy a szén alapú élet kifejlődésére alkalmas környezetek látszólag igen sajátosak. Erről a problémáról a 7. fejezetben még sokkal többet fogunk beszélni. Jelen pillanatban az a fontos, hogy pusztán megértsük: nincs „nyers adat". Ha megfigyeléseket gyűjtünk a világegyetemről, de nem értjük meg a világegyetemet „elszínező", rendszeres torzításokat, akkor nem tehetünk többet annál, minthogy elkészítjük a megfigyelések mindennemű megbízható összefüggést nélkülöző katalógusát. Ilyen megfigyelésekből a természet igazi törvényeit soha nem lehetne megállapítani.

Az elmélet céljai

Ha a világegyetem jelenlegi állapota pontosan hasonló volna a világegyetemet létrehozó előző állapothoz, akkor maga is hasonló állapotot szülne: emez állapotok egymásra következése ekkor végtelen sokáig folytatódna.

Pierre Laplace

Azzal kapcsolatban, hogy Einstein gravitációs elmélete sikeresen megjósolja a világegyetem tágulását, a leginkább figyelemre méltó az, hogy igazolja: egyenletei a világegyetem mint egész viselkedését írják le, nem csak alkotó elemeiét. Egyetlen más természeti törvényt sem alkalmaztak soha ily módon. Einstein egyenletei még akkor is képesek leírni a világegyetem tágulását és átfogó tulajdonságait, ha az végtelen kiterjedésű. Ha meg tudjuk határozni a világegyetem anyagtartalmát, valamint azt, hogy az anyag miképpen mozog, akkor – legalábbis elvben – Einstein egyenletei mindig meg tudják adni a tér görbületét és az idő folyásának módját bármely pontban. A gyakorlatban nem vagyunk képesek így megállapítani a világegyetemben található összes anyag elhelyezkedését, és még ha képesek volnánk is megtenni, Einstein egyenletei túlságosan nehezek lennének ahhoz, hogy mi magunk vagy ez idő szerint legokosabb számítógépeink megoldják.

Einstein általános relativitáselméletének képessége a világegyetem mint egész viselkedésének leírására és előrejelzésére érdekes dilemmát okoz: a miénktől eltérő világegyetemeket is leír! Einstein egyenleteire számos különböző megoldást találhatunk. Minden megoldás egy-egy eltérő típusú világegyetemet ír le. Egyesek rendkívül szabálytalanok, mások forognak, sőt összehúzódnak tágulás helyett, megint mások különböző irányokban más sebességgel tágulnak, valamint vannak rezgésben lévők és még állandóak is. A lehetséges világegyetemek eme bősége azt mutatja, hogy Einstein elmélete nem lehet a teljes történet. Csak egyetlen létező világegyetem van (definíció szerint), és Einstein egyenleteinek csak egyetlen, ezt leíró megoldása. Akkor hát miért van annyi más, felesleges, egyéb hipotetikus világegyetemeket leíró megoldás? Lehet, hogy mind ott vannak kint, benépesítve Everett sok világát, de ha nem, akkor nyilván nem tudunk egy lényeges rostáló elvről, amely egy kivételével kiküszöböli az összes Einstein-féle világegyetemet, valamilyen mélyebben rejlő ellentmondásra alapozva, nem pedig pusztán a tapasztalati megfigyelésekkel való ellentmondásra hivatkozva. Ehhez a rostáló elvnek egyértelműen meg kellene adnia a világegyetem kezdeti állapotát. Sok mai kozmológusnak ez a meggyőződése, s ez azt a reményt fejezi ki, hogy a jövőben megtalálják majd a természet új leírását, amely egyesíti mind a kvantumelméletet, mind pedig az általános relativitáselméletet, vagy egy kifinomultabb elképzelést eredményez, amely e teóriák sikeres elemeit megtartja, a lényegteleneket pedig kiselejtezi. Kétségtelenül mind a kvantumelméletet, mind pedig a relativitáselméletet bizonyos mértékben módosítani fogják, hogy sikeresen írják le a nagy sűrűségű állapotokat, ahol hatásaiknak eddig még nem látott módon kell vetélkedniük. Ennek ellenére rendkívül valószínűtlennek látszik az az elképzelés, hogy a természet e két alapvető elméletének egyesítése elegendő lesz a világegyetem

lehetséges leírásának egyértelmű meghatározásához. A világegyetem rendkívül bonyolult szerkezet. Mindenütt göröngyöket, szabálytalanságokat látnak benne. *Pontos* szerkezete túl bonyolult ahhoz, hogy meghatározzuk és kodifikáljuk, ellentétben egy jól sikerült idealizációval, melyben egyenletesen elosztott anyag tágul minden irányban azonos sebességgel. A világegyetem szerkezete a természeti törvények és a véletlen egyidejű működésének eredménye. Hogyan „jön ki" szükségszerűen és egyértelműen e valódi és mérhetetlenül bonyolult világegyetem alapvető szerkezete a jövő szuperkvantum-relativitásából? Még ha ez lehetséges volna is, mi soha nem tudnánk kibontani belőle. A világegyetem eme teljesen pontos leírásának egyenleteit túl nehéz volna megoldani. Ha ez az egyetlen megoldás, akkor nem lesznek egyszerűbb, idealizált esetek, hogy irányt mutassanak. De még komolyabb probléma a következő: ha az a meggyőződésünk, hogy a természet bármely leírása és törvénye egy bizonyos szinten szükségszerűen csak közelítése az igazi valóságnak, akkor soha nem fogjuk ezt az egyedülálló és pontos leírását megtalálni, mert végső fokon egyenleteink nem képesek leírni a valóságot.

Hangsúlyoznunk kell, hogy jelenleg nincs semmi probléma sem a kvantumelmélettel, sem az általános relativitáselmélettel. Mindkettő teljes összhangban van a világon elvégzett összes megfigyeléssel. Mindegyikről azt hisszük, hogy belsőleg ellentmondásmentes, és mindkettő feltűnően pontos előrejelzéseket adott a világegyetem szerkezetéről. Mégis, a fizikusok tudton tudják, hogy legjobb esetben is csak részigazságokkal van dolguk. Az általános relativitáselmélet nem kvantumos jellegű, és a kvantumelmélet nem határozza meg a téridő geometriáját, melyben a hullámfüggvény viselkedését előírja. Szerencsére eddig még nem találkoztunk közvetlenül olyan környezettel, melyben mind a kvantumbizonytalanság, mind pedig a görbült téridő észrevehető módon megnyilvánulna. Egy ilyen környezet a sűrűség és hőmérséklet olyan szélsőségesen magas értékeit kívánná meg, melyek trilliószorosan meghaladják a legsűrűbb csillagok középpontjában található értékeket. A világegyetem – történetének kezdeti pillanatában, amikor elkezdett tágulni a nagy ősrobbanásnak nevezett pokolból – az egyedüli ismert hely, ahol a kvantumgravitáció kettős hatása főszerepet játszhatott. Ezt a környezetet nem tudjuk közvetlenül megfigyelni, de kideríthetjük, hogy az ilyen szélsőséges környezetben végbemenő folyamatokra vonatkozó elméleteink a világegyetemben ma látott helyzettel ellentmondó következtetésre vezetnek-e, vagy azt, hogy egyáltalán képesek-e fényt deríteni a világegyetem nagy léptékű szerkezetével kapcsolatos főbb rejtélyekre.

Alig több, mint tíz évvel ezelőtt ez a keresés még eléggé reménytelennek látszott. Amint képzeletünkben az időben visszatekintettünk táguló világ-

egyetemünk korai szakaszaira, egyre növekvő sűrűségű környezettel találkoztunk, melyben a részecskék mind nagyobb és nagyobb energiával ütköztek. Úgy gondoltuk, hogy ez folyamatosan növekvő bonyolultságot és a világegyetemet akkor alkotó részecskék közti kölcsönhatás állandó erősödését jelzi; minél messzebb néznénk vissza, a probléma annál kevésbé lenne kezelhető. Az e fejezetben korábban tanulmányozott kvantumvákuum hatásai azonban, melyek a természet különböző erőhatásainak tényleges erősségét a hőmérséklet emelkedésével megváltoztatják, azt jósolják, hogy a természet erői a nagy ősrobbanás nagy sűrűségű környezetében *gyengébbek* és *egyszerűbbek* lehettek, nem pedig erősebbek és bonyolultabbak. Ez a felismerés lehetővé tette, hogy a világegyetem történetének igen korai szakaszát vizsgáló kutatásokat komolyan vegyük. Manapság a részecskefizikusok valójában a kozmológiát tekintik az egyedüli eszköznek a nagyon nagy energiák közrehatása esetén érvényes természeti törvényeket illető számos ezoterikus előrejelzésük igazolására.

Az állandó állapotú *(steady state)* világegyetem képviselőinek öröksége

> Már megtanultuk, hogy a földrajz nem számít. Az állandó állapotú világegyetem elmélete megtanít arra, hogy a történelem sem.
>
> Herman Bondi

A táguló világegyetem nagy ősrobbanás *(Big Bang)* elmélete az a középponti paradigma, amelyen belül a csillagászati megfigyeléseket összekapcsoljuk egymással, és a világegyetem történetét újraalkotjuk. Mindössze egyetlen komoly vetélytársa akadt. 1948-tól 1965-ig Thomas Gold, Herman Bondi és Fred Hoyle egymástól függetlenül egy alternatív kozmológiai elképzelést támogattak. Az „állandó állapotú" világegyetem, ahogyan ismertté vált, gyökeresen eltérő alternatívája volt a nagy ősrobbanás elképzelésének, mely utóbbi szerint a világegyetem egy meghatározott múltbeli pillanatban keletkezett a semmiből, majd kitágult, és egyre hűvösebb meg ritkább lett, amíg elérte mai állapotát. Az állandó állapotú világegyetem elképzelése el akarta távolítani a kozmológiából mindezeket a sajátos vonásokat, és e próbálkozásához a természeti törvények kovarianciájából merített ösztönzést. A hagyományos nagy ősrobbanás kozmológia (bár ezt a nevet becsmérlő kifejezésként csak 1950-ben vezette be Hoyle) nagymértékben felhasználta a kozmológia úgynevezett alapelvét azt alátámasztandó, hogy a világegyetem szerkezetének hasonlónak kell lennie mindenhol és minden irányban, különben egyes helyek

különös jelentőségre tennének szert, ami ellentétes Kopernikusz elvével. Semmilyen megfigyelés nem képes kimutatni, hogy a mi helyünk kitüntetett kilátópont a világűrben. Úgy képzelték, hogy a természet különböző helyeken észlelt szerkezetének egyöntetűsége annak fizikai tartalmára is érvényes – az anyag sűrűségére, az átlagos hőmérsékletre, a galaxisok társulási tulajdonságaira és így tovább. Provinciális szinten nézve persze a világegyetem különböző helyeken különbözőnek látszik. A Föld felszínéről tekintve a látvány különbözik attól, amit a Nap felszínéről, vagy a galaxis középpontjából látnánk. A kozmológia alapelvét azonban csak nagyon nagy, a galaxisok méreteit meghaladó távolságokra szabad alkalmazni. Az elv azt állítja, hogy minél nagyobb léptékben szemléljük a világegyetemet, annál kisebbnek kell lenniük az átlagos különbségeknek. Az állandó állapotú világegyetem elképzelése ki akarta terjeszteni a kozmológiai elv érvényességét a térről az időre is. A „tökéletes kozmológiai alapelv" azt állította, hogy a világegyetemnek nemcsak különböző helyei, de különböző időbeli állapotai is hasonlóak; semmiféle csillagászati megfigyelés nem képes abszolút módon kitüntetni azt a korszakot, amelyben élünk. S ez azt jelenti, hogy a világegyetemnek állandó állapotúnak kell lennie, olyannak, ami a megfigyelés pillanatától függetlenül mindig ugyanolyannak látszik.

E filozófiai álláspont indítéka részben abból származott, hogy a természeti törvényeket azonosnak gondolták a világegyetem különböző helyein és korszakaiban. Úgy gondolták, hogy ez az alapja a racionális tudományos vizsgálódásnak. A tökéletes kozmológiai alapelv előírja, hogy a világegyetem szerkezetének ugyanolyan szimmetriái legyenek, mint maguknak a törvényeknek. Abból, amit ebben a fejezetben korábban már mondottunk a szimmetrikus törvények és működésük aszimmetrikus eredménye közti összefüggésekről, láthatjuk, hogy ez az indíték hibás. Ha a világegyetem szerkezete a törvények működésének megnyilvánulása, nem szükséges, hogy a törvények minden egyes szimmetriáját mutassa. Hogyan lehet a világegyetem olyan állapotban, amelyben nagy léptékű tulajdonságai mindig ugyanazok? A legegyszerűbb megoldás a statikus világegyetem, amely ugyanolyan ma, mint tegnap volt, és olyan is marad mindörökké. Ám ez rögtön ellentmondásba kerül a világegyetem megfigyelt tágulásával. A látható világegyetem nem statikus. Az állandó állapotú világegyetem nézetének képviselői olyan modellt kerestek, melyben a világegyetem tágul, de mégis mindig azonos vonásokat mutat, mint egy egyenletesen áramló folyó. Ez lehetetlennek látszik. Ugyanis ha a világegyetem tágul, akkor bármely megadott térfogatában folyamatosan csökkeni fog az anyag sűrűsége az idő előrehaladtával. Ha az átlagos sűrűséget óraként használjuk, a múlt a jövőtől gyökeresen különbözni fog: a múltbeli állapot nagy sűrűségű, míg a jelenlegi alacsony sűrűséget mutat.

Csak egyféleképpen lehet olyan állandó állapotot fenntartani, amely nem engedi meg, hogy a világegyetem bármely fizikai tulajdonságát a múlt és a jövő megkülönböztetésére használjuk fel: ha mindenütt új anyag folyamatos keletkezése zajlik, mégpedig olyan ütemben, hogy éppen kiegyenlítse a tágulás okozta sűrűségcsökkenést. Az anyag keletkezésének ehhez szükséges sebességéről kiderül, hogy túlságosan kicsi ahhoz, hogy közvetlenül megfigyelhessük. Az eredményül kapott kozmológiai modellben a tágulás sebessége nem változik, mert ha változna, mérése megkülönböztetné az egyik kozmikus pillanatot a másiktól. Nem lehet kezdete és vége – a kataklizmák e pillanatai ugyanis „speciálisak" lennének. Ez pedig szöges ellentétben áll az ősrobbanás modelljével.

Az állandó állapotú világegyetem elmélete által felvetett folyamatos anyagkeletkezés ötlete forradalmi volt. Új természeti törvény létezését követelte meg itt és most. Míg az ősrobbanás elmélete egy múltbeli pillanatban bekövetkezett, általános teremtést képzelt el (beleértve a természeti törvények teremtését), az állandó állapotú világegyetem elmélete megkövetelte a teremtés állandó folyamatát, örökkön létező törvények irányítása alatt. Sajnos, az anyag folyamatos keletkezésének semmiféle magyarázatát nem lehetett levezetni a kvantumelméletből. Egy másik kellemetlen probléma az anyag és antianyag megfigyelt aszimmetriája a világegyetemben. Hoyle később megvallotta, hogy ez volt a fő oka annak, hogy eltávolodott a folyamatos teremtés nézetétől. Ugyanis meg volt győződve arról, hogy a folyamatos teremtésnek a részecskéket és antirészecskéket azonos arányban kell létrehoznia, ezzel szemben a világegyetemben nem találunk csillagászati méretű antianyagforrásokra utaló jeleket. Nem fedeztünk fel antianyagból álló bolygókat, csillagokat vagy galaxisokat, és az egyedül a kozmikus sugárzásban észlelt antirészecskék jellemzői pontosan megegyeznek az anyag elsődleges részecskéinek ütközése által létrehozott törmelék tulajdonságaival. Végső fokon az állandó állapotú világegyetem elmélete ellentétbe került a csillagászati megfigyelésekkel. Igazolták, hogy a világegyetem tulajdonságai valóban változnak az idő folyásával. Az a tény, hogy a kvazárokat többnyire meghatározott távolságban észlelték, egyenértékű azzal, hogy a kvazárok a kozmikus történelem meghatározott szakaszában keletkeztek. Ez annak következménye, hogy a távoli fényforrásokból a fény véges időtartam alatt jut el távcsövünkbe, tehát a távoli objektumok most látható fényüket korábban bocsátották ki, mint a közelebb lévők. Az állandó állapotú világegyetem elmélete a végső csapást 1965-ben kapta, amikor felfedezték az ősrobbanás „visszhangját". 1948-ban két fiatal amerikai kutató, Ralph Alpher és Robert Herman megjósolta, hogy ha az ősrobbanás-elmélet elképzelése a forró és sűrű múltbeli állapotról helyes, akkor

e tüzes múltnak kell hogy legyen fennmaradt bizonyítéka, a világegyetem tágulása miatt az abszolút nulla fok feletti, mindössze 5 fokos hőmérsékletre lehűlt sugárzás formájában. 1965-ben Arno Penzias és Robert Wilson véletlenül rábukkantak erre a sugárzásra, miközben egy, a mesterséges holdak követésére használt érzékeny rádióvevőt kalibráltak. A sugárzás hőmérséklete 3 fok az abszolút nulla felett – szinte pontosan az Alpher és Herman által megjósolt érték –, és későbbi vizsgálatok kimutatták, hogy spektruma felmutatja a Planck-féle hősugárzás jellegzetes ismérveit. Nincs mód arra, hogy ilyen tulajdonságokkal rendelkező sugárzás a világegyetemben lokálisan keletkezzék. Később az ősrobbanás-elmélet további igazolást nyert azáltal, hogy sikeresen megjósolta a hélium, deutérium és lítium kozmikus előfordulási gyakoriságát, mely elemek mind az ősrobbanást követő tágulás első három percének magfizikai reakcióiban keletkeztek. Mivel az állandó állapotú világegyetem elmélete szerint soha nem volt magas hőmérsékletű és sűrűségű múltbeli állapot – a világegyetem mindig olyan volt, mint ma –, nem tudja ésszerűen megmagyarázni a háttérsugárzás létezését, és nem jelzi előre a könnyű atommagok előfordulási arányát olyan elegáns módon, ahogyan azt az ősrobbanás elmélete teszi.

Az állandó állapotú világegyetem elmélete az 1960-as évek közepén megbukott, néhány „elkövetőjének" hősies próbálkozásai ellenére, akik be akarták bizonyítani, hogy bukásának hírei erősen túlzottak. Nem pusztán azért szenteltünk rá ennyi időt, mert az érdeklődő laikusok oly gyakran hiszik, hogy az ősrobbanás *versus* állandó állapotú világegyetem vita még ma is folyik, hanem azért, mert az állandó állapotú világegyetem nézetének képviselői fontos örökséget hagytak ránk. Ez az örökség a mai kozmológusokat foglalkoztató, mélyreható problémák egynémelyikéhez vezet el, amelyek lényegesen befolyásolják a természeti törvények és a világegyetem mint egész kapcsolatát illető elvárásainkat.

Kaotikus kozmológia

> ... Isten a természet erőibe a káoszból tökéletes világrendszerré fejlődés képességének titkos művészetét helyezte...
>
> Immanuel Kant
> (Ford. Vidrányi Katalin)

Mióta csak Hubble először megfigyelte a világegyetem tágulását, tudjuk, hogy e tágulásnak néhány meglepő sajátsága van. Az égbolt minden irányában

gyakorlatilag azonos sebességgel folyik. A kozmikus háttérsugárzás felfedezése után nagy pontossággal meg lehetett határozni, hogy az iránytól független viselkedés - azaz ahogyan a kozmológusok nevezik: az „izotrópia" - milyen mértékben érvényesül. Úgy, hogy különbségeket keresünk a háttérsugárzás hőmérsékletének különböző irányokban mért értékei között. A különbségek elképesztően kicsinyek, kisebbek 1/100 százaléknál. Ez pedig azt jelenti, hogy a belátható legnagyobb távolságokban a világegyetem sűrűségének és tágulási sebességének helyről helyre azonosnak kell lennie. Az egyes helyek közti bármiféle jelentős különbség iránytól függő különbségeket hozna létre a sugárzás hőmérsékletében is, amint a sugárzás az ősrobbanásból kiindulva a világegyetem különböző részeinek gravitációs erőterén áthalad. Az izotrópia és az egyöntetűség eme megfigyelésen alapuló bizonyítéka támasztja alá a kozmológia alapelvének igaz voltát. Még mindig hiányzik azonban a magyarázat arra, hogy miért kellene a természetnek ilyen szorosan követnie a kozmológia alapelvét. Merőben valószínűségekre alapozva azt gondolhattuk volna, hogy nem egységes világegyetem sokkal többféle módon keletkezhet, mint egységes, és ezért azt kellene találnunk, hogy a világegyetem fölöttébb rendezetlen és szabálytalan. Továbbá azon tapasztalatunk alapján, hogy az entrópia és a rendezetlenség a termodinamika II. főtételének megfelelően az idő múlásával növekszik, azt gyaníthatnánk, hogy még abban az esetben is, ha a világegyetem rendezett módon keletkezett, a rendezetlenségnek tizenöt milliárd év állt rendelkezésére, hogy megnövekedve éreztesse elkerülhetetlen hatását. Akkor hát miért oly szabályos mégis a világegyetem?

Azzal a problémával, hogy a világegyetem miért mutat ilyen figyelemreméltó izotrópiát és szerkezeti egyöntetűséget, mikor annyiféle szabálytalan megoldás lehetséges, először az állandó állapotú világegyetem elméletének képviselői foglalkoztak komolyan. 1963-ban Hoyle és tanítványa, Jayant Narlikar felvetette, hogy az egyöntetűség minden nehézség nélkül értelmezhető az állandó állapotú világegyetem keretein belül. Az állandó állapotú világegyetemnek az a tulajdonsága, hogy egyensúlyi állapotának kismértékű megzavarása után igyekszik visszatérni az egyensúlyhoz. Egyszóval: stabil. Miként egy tálban lévő golyónak, olyan tulajdonságai vannak, hogy bármilyen megzavarása ellentétes hatást vált ki, amely visszatéríti legalacsonyabb pontjára. Ezen az alapon azt állították, hogy ha az állandó állapotú világegyetem egyszer már az egyenletes tágulás állapotában van, akkor abban is marad a folyamatosan keletkező anyag visszatartó erejének hatására, míg az ősrobbanás világegyeteme fokozatosan eltávolodna ettől az állapottól. Úgy érveltek tehát, hogy az állandó állapotú világegyetem elmélete meg tudja magyarázni az izotropikus tágulást anélkül is, hogy a teremtés valamely múltbeli, a tudomá-

nyos módszerrel történő igazolás hatókörén kívül eső pillanatakor fennálló kezdeti feltételekre hivatkozna.

Az állandó állapotú világegyetem elméletének lehanyatlása és a háttérsugárzás figyelemreméltó izotrópiájának felfedezése után az ősrobbanás kozmológusai magukévá tették Hoyle és Narlikar alapfilozófiáját: a világegyetem tulajdonságainak magyarázatát keletkezésének módjától függetlenül kell megkísérelni, kimutatva, hogy függetlenül kiindulási állapotától vagy további történetének eseményeitől sokmilliárd évnyi tágulás után elkerülhetetlenül a jelenleg megfigyelt izotrópia és egyöntetűség felé haladna. Ezt a filozófiát legkitartóbb hirdetője, Charles Misner „kaotikus kozmológiának" keresztelte el, mert célja annak bizonyítása volt, hogy függetlenül attól, milyen kaotikus állapotban volt a világegyetem tágulása kezdetén a homályba vesző távoli múltban, mindig fellépnének a tágulás során a szabálytalanságokat és anizotrópiát kiegyenlítő súrlódási folyamatok. Egy efféle elrendezésnek, ha igaz, van néhány vonzó tulajdonsága. Magyarázatot kínál a világegyetem jelenlegi szerkezetére, annak ismeretlen és talán megismerhetetlen kezdeti állapotától függetlenül. Lényegében a kozmológia alapelvének bizonyítása ez. A világegyetem jelenlegi állapotának magyarázata teljes egészében a természeti törvényekre hárulna, lényegtelen vagy semmilyen szerepet sem szánva a kezdeti feltételeknek.

Később aztán fény derült e vonzó elképzelés gyenge pontjaira. A legalapvetőbb szinten átgondolva beláthatjuk, hogy ha a világegyetem fejlődését determinisztikus törvények rendszere írja le, olyan törvények rendszere, mint az általános relativitáselmélet által felfedett és a kaotikus kozmológia művelői által elfogadott törvények, akkor a világegyetem nem fejlődhetett ki a lehetséges kaotikus állapotok közül bármelyikből. Determinisztikus törvények érvényesülése esetén bármely kezdeti állapot *valamely meghatározott* állapotba fog fejlődni 15 milliárd év tágulás után, ami egyben azt is jelenti, hogy bármiféle tetszés szerint elképzelt 15 milliárd éves állapotnak *valamely meghatározott* kezdeti állapotból kellett kifejlődnie. A kaotikus kozmológia művelőinek zavarba hozásához elegendő csupán egy olyan kozmológiai modellt leírni, amely megfelel Einstein matematikai egyenletei egyik megoldásának, de nem hasonlít a mi világegyetemünkhöz, majd visszafelé követni fejlődését, meghatározandó a keletkezéséhez vezető kezdeti feltételeket. E műveletek eredményeként példát kapunk egy kezdeti állapotra, mely nem képes az adott idő alatt a jelenlegi állapotba fejlődni. Egy determinisztikus rendszer esetében nem lehet teljesen kiküszöbölni a kezdeti feltételek hatását a rendszer jövőbeli fejlődésére.

Az első védelmi állás, ahová a kaotikus kozmológia vonzó filozófiai megközelítésének megmentésére visszavonulhatunk, a következő: megpróbál-

juk kimutatni, hogy azok a kezdeti állapotok, amelyek 15 milliárd év alatt a miénkhez hasonló egységes világegyetemekhez vezetnek, egy gondosan meghatározandó értelemben *valószínűbbek* a többinél. Ahhoz, hogy ez meggyőző lehessen, ki kellene mutatnunk, hogy az esély száz az egyhez vagy jobb, nem pedig, mondjuk, hat a négyhez. Elsöprően nagy valószínűséget akarunk. Azt kívánjuk, hogy a következtetés „minden kétséget kizáró" legyen, mint a büntető törvényszéki esetekben, nem csupán „eléggé valószínű", ami a tyúkperekben elegendő lehet. Eszményi esetben azt szeretnénk, hogy a helyzet az alább leírthoz hasonlítson. Képviseljék a könyv egyik lapjának pontjai a világegyetem összes lehetséges kezdeti állapotait. Ha pirosra festjük azokat, amelyek a miénkhez hasonló látható világegyetemhez vezetnek, és kékre azokat, amelyek nem, akkor piros háttéren elszigetelt kék pontokat szeretnénk látni, így a kék pontoktól való legkisebb eltérés piros pontba vezetne. Ezzel szemben a piros pontoktól való kis eltérés egy másik piros pontba vezetne. Az 1970-es években a kérdés minden egyes vizsgálata kivétel nélkül azzal az eredménnyel zárult, hogy a miénktől teljesen *eltérő* világegyetemekhez vezető kezdeti állapotok elsöprő módon valószínűbbek. A könyv lapja *kék* tengernek látszik, néhány elszigetelt piros ponttal. Továbbá a világegyetem első pillanataiban kialakuló, a szabálytalanságokat kisimító, bonyolult súrlódási folyamatok elővarázsolása reménytelen feladatnak bizonyult. Mindezek a fizikai folyamatok magukban foglalnak a különböző helyek hőmérséklete és sűrűsége közti különbségek kiegyenlítésére szolgáló módozatokat, sugárzás és részecskék átvitele révén, ami nem történhet a fénysebességnél gyorsabban. Így amikor a világegyetem kora T, a kisimító hatás legfeljebb a T időtartam és a fénysebesség szorzatának megfelelő nagyságú térrészben érvényesülhetett. Sajnos, abban az időpontban, amikor e folyamatok elég erősek ahhoz, hogy ténylegesen kisimítsanak dolgokat, a hatókörükbe eső térrész kicsiny, valójában kisebb, mint a Naprendszer! Nem képesek magyarázatot adni a világegyetem egyöntetűségére a ma megfigyelhető legnagyobb távolságokban.

A fenti filozófiai megközelítés iránti érdeklődés ellanyhult, és a figyelem a kaotikus kozmológiával ellentétes filozófiai megközelítésre irányult, vagyis arra, hogy milyen módon épülhetett volna be a szabályosság a kezdet kezdetétől fogva a világegyetembe. Így ment az egészen 1980-ig. Ebben az évben Alan Guth amerikai részecskefizikus más irányba terelte a kozmológiai elmélkedéseket, mert kimutatta, hogy miképpen lehet a valószínűség mérlegének nyelvét átbillenteni a kaotikus kozmológia filozófiai megközelítésének elsöprő támogatása irányába.

Infláció

Széles folyam fürge patakokból árad,
Sudár tölgy apró makkokból támad.

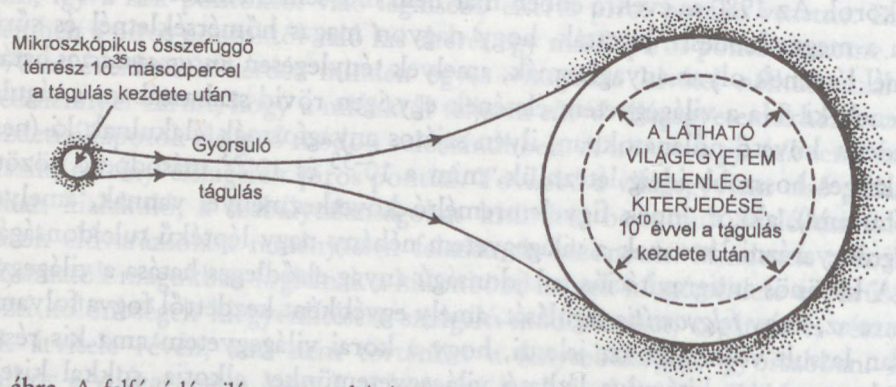
David Everett

Guth eredeti munkáját, melynek címe *Az inflálódó világegyetem** (mulatságos eszmetársítás korunkra, melyben élünk!), néhány alkalommal jelentős mértékben átdolgozta, de alapvető elképzelése ugyanaz maradt. A kaotikus kozmológia területén az 1970-es években végzett korai vizsgálatok a részecskefizika „gauge-korszakhoz" vezető forradalma előtt történtek. E korai időszakban úgy vélték, hogy az anyag minden formája gravitációs vonzást gyakorol. Az 1980-as évekre ebben már nem hitt senki. Akkortájt a fizikusok arra a meggyőződésre jutottak, hogy nagyon magas hőmérsékletnél és sűrűségnél léteznek olyan anyagformák, amelyek ténylegesen *antigravitációs* hatást fejtenek ki. Ha a világegyetem életének egy igen rövid szakaszában, a tágulás kezdetét követő pillanatokban, ilyen sajátos anyagformák alakulnak ki (nem szükséges hosszabb ideig létezniük, mint a 10^{-35} és 10^{-33} másodperc közötti időtartam!), akkor ennek figyelemreméltó következményei vannak, amelyek megmagyarázni látszanak a világegyetem néhány nagy léptékű tulajdonságát.

A különös antigravitációs tulajdonságú anyag elsődleges hatása a világegyetemre az, hogy *felgyorsítja* tágulását, amely egyébként kezdettől fogva folyamatosan lassult volna. Ez azt jelenti, hogy a korai világegyetem ama kis része, amely mostanra kitágulva látható világegyetemünket alkotja, sokkal kisebb méretűnek adódik, mint amilyennek a lassuló tágulású világegyetem mértékadó elképzelése szerint lennie kell. Valójában ez a térrész elég kicsi tud lenni ahhoz, hogy a súrlódási erők kisimítási hatókörén belül essen egy nagyon korai időpontban, mintegy 10^{-35} másodperccel a tágulás kezdete után. Továbbá amikor a világegyetem e gyorsuló tágulás szakaszába lép, a tágulás sebességében különböző irányokban fennálló minden különbség gyorsan lényegtelen mértékűvé csökken, és a világegyetem tágulása egyre inkább megközelíti az örökké táguló, illetve újra összehúzódó világegyetem-típusokat elválasztó kritikus határvonalat. Ezek az események magyarázatot kínálnak a világegyetem jelenlegi tágulásának egy már régóta ismert rejtélyes tulajdonságára.

**Inflationary*, ami angolul (és eredetileg latinul) azt jelenti, hogy „felfúvódó", és persze azt is, amit mi értünk azon, hogy „inflálódó". – *A ford.*

A világegyetem szabályosságára az inflációs elmélet által adott megoldás csábító, mert – nem úgy, mint a kaotikus kozmológia programja – nem próbálja meg *megszüntetni* a világegyetem kezdetekor esetleg létezett (vagy a végtelen múltból örökölt) őskáoszt. Úgy képzeljük, hogy az egész látható világegyetem egy mikroszkopikusan kicsiny térrész mostanra kitágult térfogatában helyezkedik el, melyről eléggé ésszerű azt feltételezni, hogy a távoli múltban lejátszódó fizikai folyamatok simították ki. A látható világegyetem simasága csupán ennek a mikroszkopikus simaságnak a tükröződése. Ha a felfúvódó tágulás gyorsuló szakasza nem következett volna be, akkor ezek a mikroszkopikus méretű, sima régiók mostanra csupán jelentéktelen méretűre tágultak volna, és az egész látható világegyetem simaságának magyarázata lehetetlen lenne (4.9 ábra).



4.9 ábra. A felfúvódó világegyetem képének sematikus rajza. Az egész látható világegyetem egyetlen mikroszkopikus méretű, okságilag összefüggő térrész gyorsuló tágulása révén alakul ki. A gyorsuló tágulás jelensége nélkül mikroszkopikus térrészek a megfigyelhető világegyetemnél sokkal kisebb méretű térségekké fejlődtek volna

Lenyűgöző az a felismerés, hogy ha a világegyetem mint egész többékevésbé véletlenszerű állapotban keletkezett volna, akkor bármelyik mikroszkopikus része sima maradt volna ugyan, de esetleg az összes szomszédos térrésztől eltérő sűrűségűvé alakulhatott volna. Ezek az ok-okozati viszony szempontjából elválasztott térrészek mind kitágulhattak, talán különböző mértékben, hatalmas térségeket hozva létre jelenlegi világegyetemünkben, amelyek azonban látható világegyetemünk horizontján túl helyezkednek el. A felfúvódó világegyetem képe azt sugallja, hogy a kozmológia alapelve nem érvényes az egész világegyetemre, csak lokálisan, annak látható részére igaz. A felfúvódási elmélet nem az őskáosz megszüntetésével magyarázza meg a

világegyetem egyöntetűségét, hanem hatásainak látókörünkön kívülre, a látható világegyetem határain túlra való kitolásával.

Visszatekintve láthatjuk, hogy a felfúvódó világegyetem elképzelésének néhány jó tulajdonsága jelen volt az állandó állapotú világegyetem elméletében, az univerzum mindig *gyorsulva* tágult. A felfúvódási tágulás először Guth által javasolt szakasza lényegében egyenértékű az állandó állapotú világegyetem történetének bármely szakaszával, és a folyamatos anyagkeletkezés hatásában utánozza ama furcsa antigravitációs anyagterek egyikét, amelyek az ősrobbanás világegyeteme igen korai szakaszának befolyásolásához szükségesek. Valóban, az állandó állapotú világegyetem elméletének Hoyle-féle változata kifejezetten bevezetett egy ilyenfajta, „C-térnek"* nevezett anyagteret.

Van még egy rejtély. Ámbár a látható világegyetem legnagyobb méreteiben figyelemreméltóan egységes, nem tökéletesen az. Nem léteznénk, ha az lenne. A világegyetemben az anyagtömörülések jól meghatározott halmaza létezik – bolygók, csillagok, galaxisok és galaxistársulások. Miért léteznek?

A kozmológia művelője mindig választásra kényszerült: vagy azt feltételezte, hogy létezik egy sima, tágulásban lévő közeg, és az abban lévő kisebb szabálytalanságok magyarázatát kereste – a világegyetem „fodrait és pliszéit", ahogyan Herbert Robertson egyszer nevezte őket –, vagy azt a nézetet osztotta, a kaotikus kozmológia kutatóihoz hasonlóan, hogy a mélyebben rejlő, sima közeg igényli leginkább a magyarázatot. Az állandó állapotú világegyetem elméletének egyik fő mumusa az volt, hogy az *örökös* gyorsuló tágulás a világegyetem sűrűségében lévő szabálytalanságok teljes megszűnéséhez vezet. Egyetlen galaxis sem maradhat fenn. A gyorsuló tágulás hatékonyabban szórja szét az anyagot annál, mint ahogy azt bármiféle gravitációs vonzás össze tudná gyűjteni.

Mivel az ősrobbanás-modellben a gyorsuló tágulás felfúvódási szakasza csak rövid ideig tart, ezért nem vezet az összes szabálytalanság megszüntetéséhez. És ami még jobb, a modell azt jósolja, hogy kis szabálytalanságok rendkívül sajátos eloszlásának kellene léteznie, hiszen minden egyes kitáguló mikroszkopikus térrész szükségszerűen legalább egy minimális szintű kvantumszemcsésséget mutat. Ez a kvantumbizonytalanság következménye, amely megakadályozza, hogy az anyag állapota pontos és meghatározott legyen. Könnyen elképzelhető, hogy ezek a felfúvódó tágulás által a tökéletes kozmológiai alapelvnek engedelmeskedő formába felerősített kvantumingadozások vezetnek az összes ma észlelt galaxis és galaxistársulás kialakulásához.

*A C betű a teremtést jelentő angol *creation* szóból származik. – *A ford.*

A világegyetem szabályosságára a felfúvódó tágulás által adott magyarázatnak van egy gyenge pontja, ahol tudat alatt „hittételeket" hívnak segítségül. Ha azt szeretnénk, hogy a világegyetem simasága és szabályossága valamely mikroszkopikus ősrégió kitágult képmásaként alakuljon ki, akkor fenn kell tartanunk azt, hogy a tér sima marad, amikor mind kisebb és kisebb méretekben vizsgáljuk. Nem tudjuk, hogy ez így van-e. A közvetlen megfigyeléssel megvizsgálható legkisebb távolság csak mintegy 10^{-15} centiméter, míg a felfúvódás szempontjából az számít, hogy milyen a tér szerkezete 10^{-30} centiméteresnél kisebb dimenziókban. Ha ilyen vagy kisebb dimenziókban a tér olyan változó, mint a hab, akkor a látható világegyetem jelenlegi szerkezetének felfúvódási magyarázata elesik. A világegyetem jelenlegi formája ez esetben e mikroszkopikus káosz kitágult képmása lenne. A Mandelbrot által „fraktáloknak" nevezett struktúrák festői példákat nyújtanak arra, hogyan létezhetnek tetszőlegesen kis méretekben sem egyszerűsíthető mintázatok (4.10 ábra, továbbá a magyarázatot lásd a *Törvény nélküli törvény* c. alfejezetben. Könnyen lehet, hogy a tér, sőt még a téridő is a bonyolultság ilyen feneketlen kútját mutatja az ősrobbanás semmihez sem hasonlítható környezetében.

Az inflációs „paradigma"

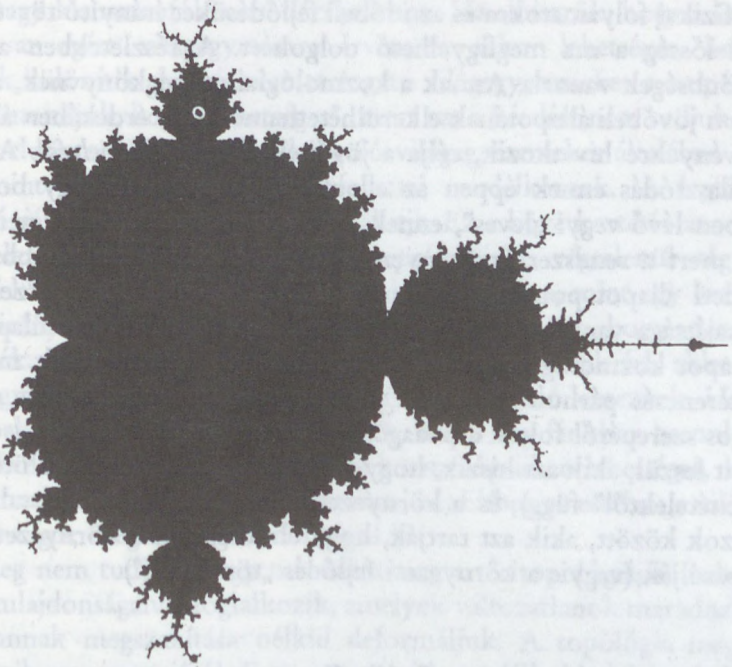
Az igazság nem az, ami bizonyítható, hanem az, ami kikerülhetetlen.

Antoine de Saint-Exupéry

A látható világegyetem szerkezetének felfúvódáson alapuló magyarázata mögött rejlő logika a következő: mutassuk ki, hogy bármilyen módon kezdődött is a világegyetem – akár kaotikusan, akár rendezetten –, a gravitáció törvényeinek elkerülhetetlen hatása az, hogy a ma általunk észlelt formába önti.

Sajnos, lehetetlen megbizonyosodnunk arról, hogy a felfúvódó tágulás valóban megtörtént-e. Hogyan tudnánk megállapítani, hogy vajon a felfúvódó tágulás által a világegyetemre ruházott sajátszerű tulajdonságokat ténylegesen a felfúvódás okozta-e, vagy azok valamely fölöttébb sajátos kezdeti feltételek tükröződései? Esetleg úgy érezhetjük, hogy módszertani szempontból az utóbbi „magyarázat" kevésbé vonzó, de antropocentrikus előítéletünk, mely előnyben részesíti a tudomány művelésének módjára vonatkozó hitünknek megfelelő magyarázatokat, nem érv azok *igazsága* mellett vagy ellen. Továbbá a felfúvódó világegyetem elképzelésének összes egyedi következményét már felvetették más, meglehetősen eltérő kozmológiai elképzelések következményeként. Az inflációs modell fő újdonsága az, hogy képes az összeset együtt, egyetlen okból levezetni.

Bár kicsi annak az esélye, hogy valaha is megtudjuk, vajon a felfúvódás-e a helytálló magyarázat a látható világegyetem nagy léptékű szerkezetére, kizárása elképzelhető. Oly módon, hogy meghatározzuk, vajon a világegyetem tényleg olyan közel van-e a végtelen tágulás és a jövőbeli összeomlás közti kritikus határvonalhoz, ahogyan azt az inflációs magyarázat megjósolja, illetve megbizonyosodunk arról, hogy a világegyetem szabálytalanságai a felfúvódási magyarázat által megadott mintázatot követik-e.



4.10 ábra. A Mandelbrot-fraktál. A képen látható mintázatban olyasfajta információ rejlik, mint például az összes lehetséges frekvencia, amelyeken egy pulzáló rendszer (mint amilyen az emberi szív) keresztülmehet, amint szabályozását elveszti, és az aritmia állapota felé halad. A tekervényes, végtelenül bonyolult mintázatot vízszintes x és függőleges y tengelyekkel rendelkező síkbeli koordinátarendszerben hozzák létre az alábbi algoritmus ismételt végrehajtásával: $(x,y) \rightarrow (x^2 - y^2 + A, 2xy + B)$, ahol A és B előre megadott, állandó értékek. A és B legtöbb értékénél az $(x,y) = (0,0)$ pontból kiinduló iteráció rövid időn belül nagyon nagy, a képen kívül eső értékeket szolgáltat, de néhány értéknél a pontok egy adott régión belül maradnak, amelynek határvonala egyre növekvő nagyításnál végtelenül folytatódó mintázatot mutat. A sötét régió e határvonalon belül a Mandelbrot-féle fraktálhalmaz. (A 189. számú fénykép reprodukciója Benoit B. Mandelbrot *The Fractal Geometry of Nature* című művéből. – Copyright© 1983. A W. H. Freeman and Co. kiadó engedélyével.)

Az a mód, ahogyan akár a kaotikus kozmológia képviselői, akár az „inflálók" a természeti törvényekkel bánnak abban a reményben, hogy a világegyetemet a kezdeti szerkezet hangsúlyozása nélkül magyarázzák meg, annak a gondolkodási stílusnak a természetes örökségeként tekinthető, amely igazán komolyan Wallace és Darwin munkásságával kezdődött el. Az élővilág részletes szerkezetének Darwin előtti magyarázata különleges kezdeti feltételekre hivatkozott: a dolgokat így teremtették. A természetes kiválasztódáson alapuló evolúció segítségül hívásának eredménye az, hogy a valamilyen isteni tervezést feltételező kivételes kiindulási állapotok jelentősége csökken, illetve az, hogy a fizikai folyamatokra és az időbeli fejlődésüket irányító törvényekre hárul a felelősség a ma megfigyelhető dolgokért. A részletekben azonban fontos különbségek vannak. Annak a kozmológiai szövegkönyvnek, amely a világegyetem jövőbeli állapotának elkerülhetetlenné tétele érdekében általános fizikai törvényekre hivatkozik, célja a jövőbeli állapot *előrejelzése*. A természetes kiválasztódás ennek éppen az ellentéte. Ha adva van egy bonyolult környezetben lévő vegyi „leves", ennek pontos jövőbeli fejlődése nem jósolható meg, mert a rendszer érzékenyen függ az 5. fejezetben később tárgyalandó kezdeti állapot pontos tulajdonságaitól. A felfúvódásnak ezzel éppen ellentétes sajátsága van, a végeredmény nem érzékeny a kezdeti állapotra. A kezdeti állapot kozmológiában játszott szerepével kapcsolatos két megközelítésnek szerencsés párhuzama az „IQ-vita", amely a „természet és nevelés" viszonylagos szerepéről folyik a pedagógusok között. Az ellentét ott egyrészt azok között feszül, akik azt hiszik, hogy az intelligencia főleg öröklött (vagyis „kezdeti feltételektől" függ), és a környezet csak lényegtelen hatással van rá, másrészt azok között, akik azt tartják, hogy elsődlegesen a környezeti tényezők befolyásolják (vagyis a környezeti fejlődés „törvényei").

A jövő

> A világegyetem hamvadó tűzön rotyog, mint egy hatalmas fazék gulyás, amelyet négy milliárd éve a tűzhelyen felejtettek. Úgyhogy előbb vagy utóbb már senki nem lesz képes megmondani, melyik benne a répa, melyik a hagyma.
>
> Arthur Bloch

Még ha a felfúvódó világegyetem elképzelése sikeres is ama merész vállalkozásában, hogy a látható világegyetem nagy léptékű tulajdonságai közül sokat úgy magyaráz meg, hogy nemigen hivatkozik a világegyetem keletkezésének módjára,

számos alapvető kozmológiai kérdést válasz nélkül hagy. Bár megjósolja, hogy azt kell látnunk: a világegyetem tágulása során rendkívül közel jut a végtelen tágulás és a későbbi összehúzódás közti határvonalhoz, mégsem mondja meg, hogy e kozmikus Rubicon melyik oldalán állunk. Úgy vélhetnénk, hogy ez csak kevéssé kielégítő. Nem várnánk-e ugyanis azt, hogy a legalapvetőbb, még nem is ismert elv, amely megszabja, hogy a vízválasztó melyik oldalán vagyunk, arról is mond valamit, hogy milyen közel vagyunk hozzá?

Az örökös tágulásra, illetve összeomlásra ítélt világegyetemek közti vízválasztónak sokkal nagyobb jelentősége van annál, hogy pusztán a kozmikus agora-, vagy klausztrofóbia előidézője lenne. Ha elhisszük, hogy a kozmológia alapelve az egész világegyetemre érvényes, akkor lehetséges, hogy e vízválasztók különítik el a végtelen térfogatú világegyetemeket a csupán végesektől. Azt mondjuk, hogy „lehetséges", mert ezt a kérdést nem tudjuk megfigyelésekkel eldönteni. A végtelenül táguló világegyetemeket általában úgy emlegetik, mint amelyek végtelen térfogattal rendelkeznek. A legtöbb elemi kozmológiával foglalkozó könyv ezt állítja. Ez a következtetés azonban azon a feltételezésen alapul, hogy a tér *topológiája* e végtelenül táguló világegyetemekben egyszerű, részletesebben kifejtve: sima, mint egy lemez, amely minden irányban a végtelenbe terjed. Lehetséges azonban, hogy a tér „lemezét" feltekerték. Ha a térnek csak egy dimenziójában tekerik fel, akkor ez megfelelne egy két szélén összeragasztott, hengert formáló lemeznek. Ha a henger két, kör alakú végét most összeragasztjuk, akkor egy fánkhoz hasonló toroidális gyűrűvé alakul. A végtelen tágulás kozmológiáiban lehetséges, hogy a tér mindhárom dimenzióban ily módon zárul be. Ebben az esetben a világegyetem térfogata *véges*, még ha végtelenül tágul is.

Jelenleg nem tudjuk, hogy mi szabja meg a tér topológiáját. A topológia a tér ama tulajdonságaival foglalkozik, amelyek változatlanok maradnak, amikor a teret annak megszakítása nélkül deformáljuk. A topológia meglehetősen különbözik a geometriától. Egy sima papírlapot félhold alakúra hajlíthatunk. Ez a művelet topológiáját változatlanul hagyja, de megváltoztatja görbületét és geometriáját – a papírlap két pontja közötti legrövidebb távolság egyenesből görbévé változik. Ha lyukat szakítanánk a papírlapban, akkor megváltoztatnánk topológiáját. Emlékszünk, hogy Einstein görbült téridő elképzelése megmutatja, milyen módon határozza meg a tömegek jelenléte a tér geometriáját és az idő múlásának sebességét. A tér topológiáját azonban nem határozza meg. A kozmológusok általában feltételezik, hogy a tér topológiája egyszerű, nem pedig valamilyen szokatlan módon bezárult (végeinek összekapcsolása révén, mint amikor a papírlap két szélét „bezárjuk", hogy hengert készítsünk) vagy kilyukasztott formájú, de igazából nem *tudhatjuk*, hogy egyszerű-e, és jó

okunk sincs egyszerűségének feltételezésére. Valójában, ha a Teremtő azt tartaná jónak, hogy egy kozmikus kalapból kihúzva válasszon ki topológiákat, akkor azt találnánk, hogy majdnem az összes ilyen különleges, zárt típusú volna. Az egyszerű topológiák azok, amelyek speciálisak. Továbbá azok a részecskefizikai elméletek, amelyek további térbeli dimenziók létezését jósolják meg a világegyetemben, megkövetelik, hogy az extra dimenzióknak szokatlan topológiája legyen, hogy megfigyelhetetlenül kicsiny, mikroszkopikus méretekbe legyenek szoríthatók. Miért kellene a többi dimenzió topológiájának minőségileg különbözőnek lennie?

Ha háromdimenziós világegyetemünk e zárt topológiák egyikével rendelkezik, akkor ezt esetleg valamilyen úton-módon a természeti törvények szabhatják meg. Azok a dimenziók, amelyek mentén a bezáródás végbemehetett az általunk látott tér mindhárom dimenziójában, a természet új és alapvető állandói. Mi határozza meg értéküket? Ha valóban létezne a „minden létező egyesített elmélete", akkor ezeket a hosszúságokat össze kellene kapcsolnia a természet egyéb állandóival. Továbbá a tér topológiája a szimmetriák természetben betölthető szerepére is hatással volna.

Látjuk tehát, hogy nem leszünk képesek eldönteni, vajon véges-e a világegyetem, még abban az esetben sem, ha feltételezzük, hogy az egész világegyetemet megfelelően reprezentálja az általunk látható része. A határ mindig messzebb lehet annál a távolságnál, amelyet a fény megtehetett a tágulás kezdete óta. A bonyolult térbeli topológia lehetősége miatt a tágulás sebessége önmagában nem ad erre választ. Ha a világegyetem horizontunkon túl egészen más, mint amilyennek azon belül látszik – ahogyan a felfúvódási elképzelés sugallja –, akkor a helyzet meglehetősen reménytelen. Sőt, mivel a felfúvódás elmélete azt jósolja, hogy a kritikus határvonalhoz nagyon közel kell lennünk (a tömegsűrűség eltérése a határértéktől kisebb, mint 1/10 000 kell legyen), a kritikus érték körüli ingadozások egyik vagy másik irányba lendíthetik a mérleg nyelvét. A szemléltetés kedvéért tegyük fel, hogy ma összegezni tudnánk a látható világegyetemben található összes anyagot. Esetleg azt találnánk, hogy 1/10 000-nyivel a kritikus érték fölött van, ami egy jövőbeli összeomlást jelez. Holnap azonban, amikor a látható világegyetem egy fénynappal nagyobb méretű, lehet, hogy ha visszajövünk, és megismételjük az anyagtartalom összegezését, azt találjuk, hogy most már a sűrűség 1/10 000-nyivel a kritikus érték alatt van, mert a világegyetem újabb, akkorra láthatóvá vált része az átlagnál inkább kisebb sűrűségű. Előző napi jóslatunkat a jövőbeli összeomlásról át kell majd értékelnünk. A pontos válasz arra a kérdésre, hogy „mekkora a világegyetem sűrűsége", egy ilyen világegyetemben nem derülhet ki. Lehet, hogy egy végtelen, állandóan táguló világegyetemen belüli „buborék-

ban" élünk, amely utánozza az összeomló világegyetemet, de az is lehet, hogy egy látszólag örökké táguló, kiritkult buborékban, amely azonban be van zárva egy őt körülvevő, a jövőben összeomló világegyetembe. Az egyedüli ok, ami miatt egyáltalán gondolhatunk ilyen kérdések feltevésére a világegyetemmel kapcsolatban, az az, hogy általában feltételezzük a kozmológia alapelvének igazságát. Az a tény azonban, hogy igazságát nem vagyunk képesek bizonyítani, még akkor sem, ha igaz, azt jelenti, hogy szembe kell néznünk azzal a következménnyel, hogy nem tudjuk eldönteni, vajon térbelileg végtelen-e a világegyetem.

A világegyetem hosszú távú fejlődésének fizikai következményei mindegyre megújuló érdeklődést keltő és alapvető fontosságú kérdések voltak, amióta csak a termodinamikával foglalkozó kutatók megfogalmazták a híres II. főtételt. A háború előtti időszakban beteges filozófiai érdeklődést tanúsítottak ama borúlátó előrejelzés iránt, hogy milyen sors vár egy örökké táguló világegyetem polgáraira (az összeomló világegyetem lakóit a nagy összeroppanás már megsemmisítette a jövő egy meghatározott pontján). Angliában Sir James Jeans és Sir Arthur Eddington egyaránt a világegyetem „hőhalálának" történetét emlegették, amelyet az entrópia elkerülhetetlen növekedése és a távoli jövőben a termodinamikai egyensúly felé való közeledés idéz elő. Azt bizonygatták, hogy az életnek előbb vagy utóbb el kell pusztulnia. A tudat és értelem szempontjából a végtelen jövő sivárnak látszott. Ez a tétel élénk érdeklődést keltett a legkülönbözőbb nézeteket valló filozófusok és teológusok körében. Egyesek, mint pl. Bertrand Russell, úgy látták, hogy a hőhalált végzetszerűen bizonyossá teszi, hogy

> a korszakok összes erőfeszítései, minden önfeláldozás, ihlettetség, az emberi lángelme minden ragyogása arra ítéltetett, hogy elpusztuljon a Naprendszer gigantikus halálában, és az emberi haladás egész templomát elkerülhetetlenül maguk alá temetik a világegyetem romjai – mindezek a dolgok, még ha nem is kétségen felül állók, mégis csaknem olyan bizonyosak, hogy egyetlen ezeket elutasító filozófia sem vehető komolyan. Ezentúl csak emez igazságok állványzatán belül és csak a makacs kétségbeesés szilárd alapzatára építhetjük fel a lélek lakóhelyét.

Mások, mint Edmund Whittaker, egy mélyebb, anyagtalan valóság bizonyítékát látták ebben a tételben:

> Annak tudása, hogy a világegyetemet teremtették, és végül el fog pusztulni, elsődleges jelentőségű a metafizika és a teológia szempontjából: azt vonja maga után ugyanis, hogy Isten nem egyenlő a természettel, és a

> természet nem egyenlő Istennel; ilyképp minden formáját elvetjük a panteizmusnak, amely a teremtett világot a Teremtővel azonosítja, és úgy képzeli el őt, mint az anyagi világegyetem kibontakozása vagy kifejlődése révén létrejöttet... Az a bizonyosság, hogy az emberi fajnak és e bolygó minden élőlényének végső fokon el kell pusztulnia, végzetes csapás a világegyetem értelmére és céljára irányuló elképzelésekre, különösen azokra, amelyeknek középponti eszméje a haladás, és amelyek az ember felemelkedésében reménykednek.

Roppant érdekes felismerni, hogy a természeti törvények formája milyen mértékben befolyásolta a világegyetem értelméről és jövőjéről folytatott filozófiai okoskodást. Bár a végső dolgok tudománya hagyományosan a vallások dolga, és a II. főtétel végzetszerűsége oly távoli jövőre vonatkozik, hogy az egyetlen élő lelket sem nyugtalaníthat, a világegyetem hőhalálának elképzelése a gondolkodók egész nemzedékét sikeresen befolyásolta és befolyásolja még ma is.

Sok minden megváltozott azóta, hogy Eddington és Jeans hírverést keltettek a hőhalálnak. Sokkal többet felfedeztünk azóta a „földgolyó berendezéséről". Felismertük, hogy mesterséges életformákat lehet előállítani olyanfajta, információt feldolgozó hardverekből, amelyek nem kötődnek a minket alkotó szerves anyagokhoz. Jóllehet bizonyosak lehetünk abban, hogy fajunk jelenlegi biokémiai formájában nem tud végtelen ideig fennmaradni, de nem zárhatjuk ki azt a lehetőséget, hogy lényegét és információtartalmát esetleg átmentheti egy eltérő közegbe.

Tisztán fizikai szinten az általunk „életnek" nevezett jelenséget a programok egy fajtájának tekinthetjük. Ezt a programot számos különböző, eltérő fajtájú „hardveren" le lehetne futtatni. Úgy adódott, hogy az általunk megtestesített formában a hardver alapvetően és nagyrészt DNS molekulákból áll, persze más, szintúgy bonyolult biokémiai vegyületekkel együtt. Az életprogram egyes részei persze csak azért vannak jelen, hogy a hardver más részeit működtessék (például a kezek és lábak mozgását), de a program futásához szükséges információt kémiaitól eltérő formában is tárolhatnánk. Ha elég ügyesek lennénk, akkor ezt az információt más közegben is tárolhatnánk – mágnesszalagon, kompakt lemezen, papíron vagy bármi máson –, és azután lefuttathatnánk az „életprogramot" egy eltérő „hardveren", talán egy elemi részecskékből álló keverékben vagy robotokban. A szervátültetés már bizonyos mértékig útban van afelé, hogy hardverünket másolatokkal helyettesítse. Mit mondanánk egy olyan egyénről, akit sejtről sejtre mesterséges alkotórészekre cserélünk? Melyik ponttól kezdve mondanánk azt, hogy megszűnt személynek lenni? A gyakorlatban a csökkent fizikai képességet és a művégtagokat mint a személyiség szempontjából lényegteleneket elhanyagoljuk;

vajon ugyanezt tennénk-e, ha ezt a dolgot tovább vinnénk? Látszólag nincs *logikus* ok az ellenkezőjére. Annak a kérdésnek az eldöntése, hogy az „élet" eme legalapvetőbb és absztrakt értelmében – információfeldolgozásként vagy számítások halmazaként, de nem szükségszerűen az általunk számítógépeknek nevezett egyszerű hardverközegben – fennmaradhat-e egy táguló világegyetemben, egyenlő annak megállapításával, hogy jelenlegi fizikai tudásunk szerint létezik-e valamely alapvető ok, amely megakadályozná, hogy egy jövőbeli számítógép végtelen számú műveletet hajtson végre. Meglepő módon kiderült, hogy ilyen számítások lehetségesek. Ez persze nem jelenti azt, hogy meg is fognak valósulni. Lehet, hogy mi vagyunk az egyedüli életforma a világegyetemben, és a következő héten megsemmisít minket egy atomháború. A hőhalál azonban nem akadályozza meg végtelen számú „bit" információ feldolgozását a jövőben. Ez másképpen azt jelenti, hogy végtelen számú gondolat gondolható el még akkor is, ha a világegyetem csak véges ideig létezik.

Az „életet" a végtelen jövőben fenntartó, önreprodukáló robotok forgatókönyve nem felel meg mindenki ízlésének (úgy érezzük, hogy ilyen életet nem *igazán* érdemes élni!). A hőhalál esetéhez hasonlóan megoszlanak a vélemények arról, hogy mi a vonzóereje és jelentősége ennek az elképzelésnek a szélesebb filozófiai és teológiai problémákat illetően. Vannak, akik elborzadva visszariadnak attól, hogy egyszer majd az ember képét meg kell változtatni, míg a már elhunyt Donald MacKay keresztény apologéta, a mesterséges intelligencia szakértője, az eltérő hardverbe való információátvitelt a test feltámadásának ábrázolásaként fogta fel. A következőket írja arról a téveszméről, mely szerint a test halála szükségképpen az élet végét jelenti:

> Nem azt akarom elhitetni, hogy az emberi lényeknek nincs több egyéniségük, mint a matematikai egyenleteknek, [de] egy adott megtestesítés megszűnte elvben nem akadálya annak, hogy pontosan ugyanaz a dolog újra testet öltsön. Éppen fordítva, rámutat arra a téveszmére, amely összetéveszti egy megtestesülés végső megsemmisülését a megtestesített dolog végső megsemmisülésével. Azt állítottam, hogy életünk során testünk fizikailag kifejezi (a megfigyelő szempontjából képviseli) tudatunkat – gondolatainkat, cselekedeteinket, szenvedéseinket és minden egyebet. Most azt mondom, hogy ha ez a fajta összefüggés áll fenn énünk és testünk között, akkor elvileg az (újra) testet öltés esetében – bibliai neve: „feltámadás" – nincs több akadály, mint akkor, ha valakinek megsemmisül a számítógépe, de szeretné ugyanazokat a számításokat egy új megtestesülésben folytatni.

Teremtés a semmiből?

Semmiből nem lesz valami.

Ismeretlen szerző

Láttuk, hogy a felfúvódási elmélet semmit sem mond a világegyetem végső sorsáról. Szinte ugyanilyen keveset mond keletkezéséről. Ama törekvésének következménye ez, hogy a világegyetem jelenlegi szerkezetét a természeti törvények logikai következményeként szeretné leírni, függetlenül attól, hogy milyen módon kezdődött. Ha a kezdeti feltételek semmiféle, a mai megfigyelések számára hozzáférhető maradványa sem élte túl a felfúvódás szakaszát, akkor a világegyetem semmilyen megfigyelése sem segíthet megválaszolni azt a kérdést, hogy „volt-e kezdete"?

A kozmológia hagyományosan alátámasztotta azt az elképzelést, hogy a világegyetem a semmiből keletkezett egy meghatározott múltbeli időpontban. Érdemes megjegyeznünk azonban, hogy sok keresztény teológus, mind katolikusok, mind pedig protestánsok, a *creatio ex nihilo* elképzelést nem tartják olyannak, mint amit a bibliai szövegek állítanának vagy rejtetten tartalmaznának. Úgy fogalmaznának, hogy a Biblia leírása szerint a teremtés a sötétségből és káoszból formált világot. A Biblia ilyetén magyarázatát támogatók azt sugallják, hogy a *creatio ex nihilo* elképzelés történelmileg alakult ki, bizonyos gnosztikus eretnek nézetek ellensúlyozására. Tagadhatatlan azonban, hogy a nyugati keresztény hagyomány feltételezte, hogy a *creatio ex nihilo* rejtetten benne foglaltatik az Ószövetség írásaiban.

Az ősrobbanás-elmélet természetes módon vezet a semmiből kitáguló világegyetem képéhez, olyannyira, hogy Steven Weinberg egyszer megjegyezte: számára az állandó állapotú világegyetem elképzelésének fő vonzóereje az, hogy – az időbeli kezdet lehetőségét kizárva – a világegyetem keletkezésének a hagyományos vallásos elképzelésekhez legkevésbé hasonlító képét nyújtja: „Az állandó állapotú világegyetem elmélete filozófiailag a legvonzóbb, mert a *legkevésbé* emlékeztet a Biblia teremtéstörténetére." Ezt a viszonyulást – legalábbis részben – kétségkívül a vallásos meggyőződésű kozmológusok ősrobbanásra való hivatkozása váltotta ki. Milne és Whittaker volt a leghíresebb hasonszőrű apologeta. XII. Pius pápa a katolikus világnézet tudományos bizonyítékait taglaló 1951-i enciklikájában felhasználta Whittaker állításait a táguló világegyetem és a keresztény hagyomány egyezéseiről. Ez a módszertan tovább él olyan tudománytörténészek munkáiban, mint Stanley Jaki, akinek szenvedélyes szembenállása bizonyos kozmológiai világegyetem-modellekkel

abból fakad, amit feltételezett múltbeli filozófiai következményeikről gondol, amikor kezdetleges formában megjelentek különböző időpontokban és eltérő kultúrákban.

Az időbeli kezdet nélküli világegyetemek roppant feladat elé állítják korlátozott képzelőerőnket. Egyes körökben a világegyetem kezdetét, amely következményként a kezdetleges ősrobbanás-modellben rejtetten benne van, logikai érvnek tekintik Isten létezésére. Ugyanis, állítják, mindennek oka kell legyen, és ezért a világegyetemnek is szükségszerűen van oka, amely lényegében „más", mint a világegyetem. A fenti érvelés logikája azonban nem túlságosan meggyőző. Bárki, aki képes elfogadni egy istenséget mint ok nélküli okozatot, bizonyára el tudja fogadni magát a világegyetemet mint ok nélküli okozatot. Sőt, van némi trükk is az érvelésben. „Minden dolognak, amellyel csak találkozunk, van oka, így tehát a világegyetemnek is kell hogy legyen oka"- szól az érvelés; a világegyetem azonban nem ugyanolyan értelemben „dolog". Dolgok összessége. Mindenkinek van anyja, de ez alapján nem következtethetünk arra, hogy minden társadalomnak vagy nemzetnek is van.

Ha az ősrobbanás-elképzelés igazságát elfogadjuk, akkor szembekerülünk azzal a problémával, hogy vajon a világegyetem tágulásának 15 milliárd évvel ezelőtti kezdete, amely a tágulás jelenlegi sebességéből levezethető, csupán egy tágulási szakasz kezdete-e vagy valamilyen értelemben az egész világegyetemé. Az utóbbi, megrázóbb alternatívának sokkal messzebbre ható filozófiai elágazásai vannak, mert azt követeli meg, hogy mind a tér és idő szerkezete, mind pedig a természeti törvények egy időben jöjjenek létre. Ez az a szempont, amely alátámasztotta Whittaker érvelését, amikor a kozmológiából levezette a Teremtőt:

> amikor a világ rendszerének fejlődését a természeti törvények fényében visszafelé követjük, végül elérkezünk egy olyan pillanathoz, amikor a fejlődés elkezdődött. Ez a fizikai tudományok végső határa, a legtávolabbi, halvány kép, amelyet az anyagi világegyetemről természetadta képességeinkkel megszerezhetünk. Nincs alapja annak a feltételezésnek, hogy az anyag ... létezett ez időpont előtt is, mozdulatlan állapotban, és egy bizonyos pillanatban valamilyen módon felvillanyozva tevékeny állapotba került; mi tudta volna ugyanis meghatározni, hogy ez, s nem bármelyik másik, legyen az adott pillanat a múlt végtelenjében? Egyszerűbb az *ex nihilo* teremtést feltételezni, vagyis az isteni akarat működését, amely a természetet a semmiből létrehozza.

Érdekes dolog felfedezni e szavakban a nagyon régi „Miért nem korábban?" érvet, amelyet azokkal a világegyetemekkel szegeznek szembe, amelyeknek

kezdete van az idő egy meghatározott pillanatában. Az érvet legelőször Parmenidésznél és Arisztotelésznél találjuk meg, de leginkább Szent Ágoston nevéhez kapcsolódik, aki arra a kérdésre, hogy „Mivel foglalkozott a Teremtő a világ teremtése előtt?" azt válaszolta, hogy a teremtés előtt nem létezett idő, ezért a kérdés értelmetlen.

Az 1960-as évek elején nagy volt a zűrzavar akörül, hogy valóságos-e a világegyetem látszólagos kezdete, amelyet levezethetünk történetének visszapergetésével a nulla méret és végtelen sűrűség állapotába. Einstein egyenleteinek a táguló világegyetem jelenlegi állapotát legsikeresebben modellező kozmológiai megoldásai azok, amelyekben a tágulás minden irányban pontosan azonos sebességgel történik. Ez a valóságnak csupán közelítése, mindazonáltal jelen pillanatban igazán nagyon jó közelítése. Ám elképzelhető, hogy a múltban a dolgok nem voltak ilyen szimmetrikusak. Nem lehetséges-e vajon, hogy a múltbeli „Bumm", amelyben az egész világegyetem egyetlen pontba volt sűrítve, azért jelenik meg, mert a tágulást teljesen szimmetrikus módon követjük visszafelé? Ha a szimmetriát kissé megzavarnánk, akkor az egyenlőtlenségek a múltba visszafelé haladva növekednének, és lehet, hogy a Bumm elmosódna; valójában sohasem történt meg. Vagy nem jelenhetne-e meg egy ismeretlen természeti erő, amely a kezdetekig visszamenő, gyermeteg extrapolációnk eredményét megváltoztatná? Még finomabban kifejtve; lehet, hogy csupáncsak a világegyetem tágulásának hibás leírását választottuk, és nem a világegyetem, hanem pusztán ez a *leírás* az, amely eltorzul az ősrobbanásig visszamenve? Valami hasonló történik a földgömbön, amikor az Északi- vagy Délisarkot megközelítjük. A hosszúsági körök kereszteződnek és összetorlódnak, „koordináta-szingularitást" hozva létre a sarkoknál, de a Föld valódi felszínével nem történik semmi különös. Bevezethetnénk a sarkok közelében egy másik koordinátacsoportot azért, hogy térképészeti leírásunk e betegségét kiküszöböljük.

Az 1960-as évek közepe táján Roger Penrose angol matematikus úttörő munkájával kidolgozott egy matematikai megközelítést, amely lehetővé tette, hogy a világegyetem „kezdetének" fogalmát pontossá tegyük. Ezáltal elkerülünk mindenféle kétértelműséget a hamis kezdeteket illetően, melyeket csupán az hoz létre, hogy a világegyetem fejlődésének matematikai leírása felmondja a szolgálatot. Ezek után pontosan fel lehet sorolni azokat a feltételeket, amelyek fennállása esetén a világegyetem kezdetének szükségszerű létezésére következtethetünk. Stephen Hawkinggal együttműködve Penrose kimutatta, hogy *ha* 1. a gravitáció vonzóerő, és mindenre hat, 2. a világegyetem jelenleg tágul, és elegendő mennyiségű anyagot tartalmaz, valamint 3. az időutazás lehetetlen, *akkor* az általános relativitáselmélet megköveteli, hogy a tér és idő valamikor a múltban véget érjen. A tér és idő világegyetemének „széle" van.

A fenti eredménnyel kapcsolatban néhány megjegyzést kell tennünk. Először is, ez egy *tétel*, nem pedig egy *elmélet*. Vagyis ha a premisszái igazak, akkor a konklúzió logikailag következik belőlük. Ha valamelyik feltétel nem teljesül, akkor az állítás nem feltétlenül következik belőlük, bár ettől még igaz lehet. Az 1–3. feltételek tehát *elégséges*, de nem *szükséges* feltételei annak, hogy kimutassuk a téren és időn át vezető út létezését, amelynek véget kell érnie a múltban. Az út végét nevezzük „*szingularitásnak*". Ez volna az idő kezdete annak az utazónak, aki az időben visszafelé haladna. Mielőtt megvizsgálnánk a tételben felhasznált 1–3. feltételek érvényességét, vizsgáljuk meg az általa megjósolt szingularitás néhány váratlan tulajdonságát. Először is vegyük észre, hogy mit *nem* mond a tétel a kezdeti szingularitásról. Nem követeli meg, hogy a világegyetem összes pontja részt vegyen benne; azt sem követeli meg, hogy azok a pontok, amelyek részt vesznek benne, ugyanabban az időpontban tegyék ezt; ugyancsak semmit nem mond végtelen sűrűségekről vagy a népszerű ősrobbanás egyéb cicomáiról. Később próbálkoztak annak bizonyításával is, hogy – az 1–3. feltételekhez hasonló körülmények fennállása esetén – az általános szingularitás mindent magában foglal, és ennek oka abban a tényben keresendő, hogy a fizikai mennyiségek, mint pl. a sűrűség, végtelenné válnak, de e próbálkozások még nem voltak teljesen sikeresek. Ezek a kérdések továbbra is nyitottak.

A 6. fejezetben többet mondunk majd a tér és idő szingularitásainak jelentéséről. Most figyelmünket ama feltételek megtárgyalására korlátozzuk, amelyeknek teljesülniük kell ahhoz, hogy a szingularitások előfordulása kényszerítő erővel bekövetkezzék. A legmeglepőbb az a kikötés, hogy az időutazásnak lehetetlennek kell lennie. Könnyű belátni, hogy miért van szükség erre a kikötésre. Ha az összes lehetséges időbeli utak mind zárt hurkok lennének, akkor egyikük sem végződhetne szingularitásban. Ezt a lehetőséget hipotézissel kell kizárni, mert Einstein gravitációs törvénye tulajdonképpen megengedi az időutazást. 1950-ben Kurt Gödel, a nem-teljességi tétel híres megalkotója, Einstein egyenleteinek olyan megoldását találta meg, amely egy időutazást megengedő, forgó világegyetemet ír le. Bizonyos megoldása más tulajdonságokkal is rendelkezik, amelyek kizárják, hogy a mi világegyetemünket írná le, mindazonáltal nem tudjuk, hogy Einstein egyenleteinek a mi világegyetemünkre legjobban hasonlító megoldása szintén tartalmazza-e az időutazás lehetőségét. Ha a gravitáció törvénye Einstein elmélete, akkor az időutazás látszólag lehetséges egyes helyzetekben. Nem tudjuk, hogy e helyzetek megvalósulása összefér-e más természeti törvényekkel. Ha az időutazásnak a Hawking–Penrose-tételre gyakorolt hatása nem érdekel minket, akkor legnyugtalanítóbb vonása a „Mi történik, ha megölöm

nagyanyámat?" jellegű ténybeli ellentmondások lehetősége. Ha azonban az egyes idő-hurkok visszatérési ideje mind sokkal nagyobb a táguló világegyetem jelenlegi életkoránál, akkor csak később kell majd átélnünk ezeket a különös, okozat nélküli hatásokat. Az időutazás Einstein világegyetemei közül tulajdonképpen csak nagyon kevésben lehetséges.

A szingularitástétel fennmaradó feltételei közül a 2. tapasztalataink szerint érvényesülni látszik, ám az 1. feltétel a döntő. Figyelemreméltó módon kiderül, hogy a világegyetem igen korai szakaszában a felfúvódó tágulás létrehozásához szükséges feltételek éppen *ellentétesek* az 1. feltétellel.

Az 1960-as évek közepe táján, amikor a szingularitástételt először fogalmazták meg, az 1. feltétel teljesen ésszerűnek látszott. Mára a fizikusok teljesen megváltoztatták ezzel kapcsolatos nézeteiket. Nincs okunk azt várni, hogy az anyag összes, a szingularitás megközelítésekor észlelt, nagy energiáknál megjelenő formája gravitációs vonzást fog kifejteni. Ez azt jelenti, hogy a kezdet létezése nem feltétlenül szükséges. Mindamellett, ahogyan korábban már említettük, az 1. feltétel megsértése a felfúvódás szakaszának valamely pontján nem jelenti azt, hogy a szingularitás nem létezhet, csak azt, hogy nem kell léteznie. Sokféle kozmológiai modell van, amely le tudná írni világegyetemünket, kezdeti szingularitásuk is van, mégis keresztülmennek egy felfúvódási táguláson. A lehetőségek e túltengése azonban azt jelenti, hogy Hawking és Penrose szingularitástétele nem engedi meg azt a következtetést, hogy az időnek kezdete volt. Még akkor sem, ha feltételezzük, hogy a természeti törvények az időben visszafelé haladva egészen a legkorábbi pillanatokig változatlanok maradnak.

Megpróbálkoztak azzal is, hogy Einstein gravitációs elméletének fejlettebb, a kvantumelmélet lényeges vonásait magában foglaló változatait dolgozzák ki, amelyek ezáltal a gravitációt kvantumtérként kezelnék. Ez a mai elméleti fizika egyik frontvonala. A kvantumgravitáció elméletének jelenleg még nincs különösen meggyőző változata. Sokan hisznek abban, hogy az éllovas a szuperstring-elmélet lesz. Anélkül, hogy belemerülnénk Einstein általános relativitáselmélete kvantálásának elrettentő technikai részleteibe, beláthatjuk, hogy az általános relativitáselmélet és a kvantumelmélet összeházasítása problémákkal terhes. Az általános relativitáselmélet fő mondanivalója az, hogy az anyag eloszlása a világegyetemben meghatározza a tér geometriáját és az idő folyásának sebességét, ugyanakkor azonban a kvantumelmélet azt mondja ki, hogy soha nem tudhatjuk pontosan az anyag térbeli helyzetét. Honnan tudjuk tehát, hogy milyen a tér és idő szerkezete, amelyben a tömegeket el kívánjuk helyezni? A kvantumgravitáció új elmélete talán megjósolja, hogy a világegyetemnek kezdete volt, de az is lehet, hogy nem.

Ha valóban létezett egy, az egész világegyetemet magában foglaló szingularitás, akkor a szingularitás előtti pillanatban semmi sincs. Még az „előbb" kifejezésnek sem lehet bármiféle értelmet tulajdonítani. Nem létezik szingularitás előtti idő, és ha a természeti törvényeket időben visszafelé extrapoláljuk, akkor a szingularitásnál felmondják a szolgálatot. Másképpen úgy is mondhatnánk, hogy spontán módon keletkeznek a szingularitásnál (a 6. fejezetben ezt a dolgot részletesebben fogjuk tárgyalni). Így tehát a világegyetem történetének azokban a leírásaiban, amelyek elkerülhetetlen módon megjósolják egy mindent felölelő szingularitás létezését a múlt egy meghatározott pillanatában, a világegyetemet úgy kell tekintetnünk, mint amelyet abban a pillanatban *ex nihilo* teremtettek. Az elmélet nem magyarázza meg, hogy ez *miért* történt; pusztán azt mondja ki, hogy a fent felsorolt 1–3. feltételek fennállása esetén a világegyetem és törvényei nem létezhettek mindig; spontán módon kellett keletkezniük egy múltbeli pillanatban. Hasonlóképpen, ha a világegyetem elegendő mennyiségű anyagot tartalmaz, akkor tágulása egy napon összehúzódássá fog változni, és össze fog omlani egy szingularitásba, amelynél a tér, az idő és a természeti törvények megszűnnek majd létezni. Ha az 1–3. feltételek nem teljesülnek, akkor a világegyetem még összeomolhat, ha elegendő anyagot tartalmaz, de nem tudjuk, hogy milyen lehetne végső állapota. Elképzelhető, hogy visszapattan egy új tágulási szakaszba, és azután a végtelenségig folytatja e körkörös történetet.

Az utóbbi években a fizikusok elkezdték a világegyetem spontán keletkezését fizikai problémaként tárgyalni. Akik ezt teszik, azok feltételezik, hogy a relativitáselmélet és a kvantumelmélet jövőbeli egyesítése, amely feltárja a gravitáció viselkedését a mérhetetlenül összesűrített anyagban, el fogja kerülni a szingularitástétel által megkövetelt igazi szingularitás létezésének megjóslását. Bár nem várjuk azt, hogy a szingularitástétel feltevései érvényesek a szingularitás közelében, még nem tudjuk, hogy elvárjuk-e vagy sem a szingularitás létezését. Egyes elgondolások szerint azonban – még ha a világegyetem kezdetét kijelölő eme szingularitás nem létezik is – a kvantumelmélet egész világegyetemre történő alkalmazása esetleg fizikai értelmet adhat a „világegyetem semmiből való teremtése" elképzelésnek. E kutatások célja annak kimutatása, hogy a táguló világegyetem keletkezése elkerülhetetlen. Annak oka, hogy létezik valami, az, hogy a „semmi" nem stabil.

Kétfajta képet festhetünk erről a folyamatról. Emlékszünk arra, hogy korábban bevezettük a látszólagos fluktuációk fogalmát, vagyis E energia T időtartamú spontán megjelenését úgy, hogy E és T szorzata kisebb a Planck-féle h hatáskvantumnál, tehát a jelenség megfigyelhetetlen. A jelenség értelmezésének egyik módja az, ha azt állítjuk, hogy a természet megengedi az

energiamegmaradás elvének lokális megsértését, mindaddig, amíg ez megfigyelhetetlen. Mármost ha az egész világegyetem egy nullához igen közeli összenergiájú vákuumfluktuáció volna, akkor ez megengedné fennmaradását nagyon hosszú időtartamokra, és T talán évek tízmilliárdjaival lehetne egyenlő. Furcsa módon ha a világegyetem a csak véges időtartamig létező zárt típusba tartozik, akkor „energiája" definíciójának egyetlen értelmes módja nulla értéket eredményez. Ebben az esetben előtűnhetne a „semmiből" az energiamegmaradás elvének megsértése nélkül. Bár intuíciónk azt súgja, hogy valaminek a semmiből való teremtése szükségképpen megsért valamilyen megmaradási elvet, könnyen lehet, hogy az összes megmaradó mennyiség – mint például elektromos töltés, perdület, teljes energia – a világegyetemre mint egészre vonatkoztatva nulla értékű (vagy egyáltalán nem létező fogalom), és ezért lokális jellegű megmaradásuk elve egyáltalán nem akadályozhatja a világegyetem „semmiből" való keletkezését.

A fenti heurisztikus érvelésnél magasabb szinten léteznek a kvantumvilágegyetem viselkedésének tanulmányozására használt elméletkezdemények ama megoldásai, amelyek matematikailag egyenértékűek azzal, hogy az egész világegyetem a semmiből tűnt elő. Ez azt jelzi, hogy a „kvantumsemmi" nem stabil, és előbb-utóbb valami mássá fog átalakulni. Mielőtt elkezdenénk lelkesedni ezekért a színpadias elképzelésekért, helyes, ha valamelyest kritikusabban szemléljük a nyelvhasználatot. Tegyük fel, hogy létezik a kvantumkozmológia szilárd alapokon álló elmélete, amely az időben lejátszódó eseményként megengedi a világegyetem spontán keletkezését, de előtte nem volt világegyetem és táguló anyag. E trükk sikeréhez még el kell ismernünk azt is, hogy van jelentős számú, korábban már létező természeti törvény. Valójában semmiképpen sem mutatjuk ki a „semmiből való teremtést" olyan értelemben, ahogyan a „semmi" szót általában használjuk. Feltételezzük a kvantumtörvények, kvantumterek, a tér, az idő és feltehetőleg a matematikai logika előzetes létezését. Jelenleg nincs értelmes módja annak, ahogyan kiküszöbölhetnénk őket. A kvantumkozmológia viszont azt a tényt próbálja kihasználni, hogy a kvantummechanikában valóságos értelemben vannak hatások okok nélkül. Ezt még az előző fejezetben ismertetett egyszerű kettősrés kísérletben is láttuk. A célfelületre energia jut el, de ezt az eseményt semmiféle értelmes módon nem tulajdoníthatjuk valamely meghatározott ok következményének. Nem tudjuk „megtalálni" az eseményt okozó neutront. Nem tudjuk felfedni, hogy melyik résen haladt keresztül.

A közönséges kvantummechanika ezen utolsónak említett vonása szorosan összekapcsolódik azzal a ténnyel, hogy a megfigyelőt és a megfigyeltet a kvantumvalóságban nem lehet úgy szétválasztani, mint hagyományos klasszi-

kus párjában. Amikor azonban elkezdjük a kvantumelméletet az egész világegyetemre alkalmazni, új és sajátságos problémák merülnek fel. Először is, a kvantumelmélet nem teszi lehetővé, hogy pontosan előre jelezzük: egy adott kísérletnek mi lesz az eredménye; csak egy bizonyos eredmény észlelésének valószínűségét tudjuk megadni, amikor a mérést elvégezzük. A kozmológiában azonban a valószínűség egész elképzelése különös azért, mert csak egyetlen világegyetem létezik. Einstein ellenkezését a kvantumelmélet valószínűségi értelmezése mint végső szó ellen csak megerősítette volna, ha elgondolkodott volna azon, hogy milyen következményekkel jár ez másik alkotására, a relativisztikus kozmológiára nézve. Még különösebb az, hogy amennyiben ragaszkodunk Bohr doktrínájához, akkor a kvantum-világegyetem nem értelmezhető addig, amíg meg nem figyelik. De ki figyeli meg? Ki alakítja át a megfigyelés aktusával az egész világegyetem hullámfüggvényét – a benne rejlő információval a világegyetem összes lehetséges állapotára vonatkozóan – egy meghatározott állapotba? A teológusok nem különösebben lelkesedtek azért, hogy Istennek a végső megfigyelő szerepét tulajdonítsák, aki az egész kvantum-világegyetemet létrehozza, de egy ilyen elképzelés összhangban van a dolog matematikájával. E lépés elkerülése érdekében a kozmológusok arra kényszerültek, hogy a kvantumelmélet Everett-féle „sok világ"-értelmezését hívják segítségül, hogy így értelmet adjanak a kvantumkozmológiának. Emlékszünk arra, hogy ez az elképzelés nem követeli meg a hullámfüggvény meghatározott állapotba történő csodálatos és rejtélyes „összeomlását" ahhoz, hogy a dolgoknak értelmet adjon. Az Everett-féle elképzelésben nem szükséges, hogy a világegyetemet mint egészt valaha is észlelje valaki. Az ár, amelyet ezért az egyszerűsítésért fizetnünk kell, az, hogy el kell fogadnunk a világok sokszorozódását, amelyek minden egyes, valaha is végbemenő fizikai kölcsönhatás révén keletkeznek. Ezért van az, hogy a kvantumvalóság Everett-féle értelmezésének szinte minden komoly támogatója kozmológus. Ez a kvantumvalóság egyetlen olyan értelmezése, amely egyáltalán lehetővé teszi, hogy a kvantumkozmológia tudományos kutatásként létezzék.

A filozófusok – igaz, meglehetősen bátortalanul – megpróbálkoztak azzal, hogy bevezessék a semmiből való teremtést a fizikai világra vonatkozó logikai következtetésekbe. Indítékuk e ténykedésre gyakran az a vágy volt, hogy a természeti törvényekből levezetett Isten létezését támogató érveket aláássák. Ezeknek az érveléseknek a legkülönfélébb problémái vannak, és valójában, lévén logikai érvelések, soha nem tehetnek többet annál, mint hogy választást kínálnak. Csak akkor bizonyítanak be bármit is, ha az érvelés alapjául szolgáló kezdeti feltételezéseket elhisszük. Mindig fennáll az a választási lehetőség, hogy a feltételezéseket – és velük együtt az érvelés eredményét – elhiggyük vagy elvessük. Azok az érvek, amelyek Isten létezésének bizonyítása érdekében a

világegyetem létének és kezdetének ténye felé tekintenek, nem túlságosan meggyőzőek a tudósok számára. Azzal a nézettel szemben, mely szerint a természeti törvények alkotója Isten, érdekes általános ellenvetés az a kérdés, hogy miért éppen azt a világegyetemet és azokat a természeti törvényeket teremtette, amelyeket teremtett. Ha a választásnak semmilyen oka nem volt, akkor találtunk valamit, amire nem érvényesek a természet törvényei. Ha voltak korlátok, amelyek a tényleges választást előírták, akkor Isten egy magasabb természeti törvény hatása alatt áll. A kaotikus kozmológia filozófiája azonban, a felfúvódó világegyetem képéhez hasonlóan, burkoltan elismeri azt a tényt, hogy a világegyetem szerkezete kezdetben nagyszámú lehetséges eset akármelyike lehetett volna, amelyek közül később bármelyik ugyanazt a világegyetemet eredményezi. Így az ellenérvelés „vagy/vagy" eleme kissé meginog. Egyedülálló jelleg véletlenszerű választásokból is kialakulhat, még olyan mértékben is, ahogyan korlátozott képzeletünkkel el tudjuk gondolni.

Kozmológia és a törvény

A bíró olyan joghallgató, aki saját vizsgadolgozatait osztályozza.

H. L. Mencken

Az előző részek egy meglepő történelmi tényről vallanak: tudományos közleményekben tárgyalják, és a *tudományos* vizsgálódás tárgyának tekintik a világegyetem teremtését – egy olyan kérdést, amellyel egykor csak a teológusok és metafizikusok bíbelődtek. A *Physics Letters* tudományos folyóirat nemrég egy elismert szerző tollából közölt cikket *A világegyetem teremtése a semmiből* címmel. A világ vezető elméleti kozmológusainak zöme érdeklődik mostanában az efféle problémák iránt. Mulatságos, hogy nem sokan ismerik fel, hogy az ilyesfajta kérdésekkel foglalkozó amerikai fizikusok, akik az USA állami egyetemein tartott előadásaikban és szemináriumaikon eredményeiket terjesztik, valójában megsértik az amerikai törvényeket!

1981. december 7-én az amerikai Arkansas államban egy színpadias bírósági ügy kezdődött el, amelyet a Polgári Szabadság Amerikai Egyesülete vitt bíróság elé, hogy megtámadja *A teremtés tudományának és az evolúció tudományának egyenlő kezelése* nevezetű törvényt, amely baljóslatú körülmények között csúszott át Arkansas törvényhozásán, és törvényerőre is emelkedett, miután White kormányzó aláfirkantotta a nevét. Egy hónappal később, mindenféle vallási és tudományos híresség „szakértői" véleményének

meghallgatása után, Overton bíró kihirdette ítéletét a „kreacionistákkal" szemben, akik azt kívánták, hogy álcázott vallásos nézeteiket tudományként más tárgyakkal azonos időtartamban tanítsák az állami iskolákban. Bár meg vagyok győződve arról, hogy az ítélet helyes volt, igen tanulságos megvizsgálni azt a hosszadalmas és zavaros fejtegetést, amely Overton bíró döntése mögött áll. „A világegyetem, az energia és az élet semmiből való pillanatszerű teremtése" kapcsán az alábbiakat mondja:

> a „semmiből való teremtés" a nyugati vallások egyedülálló elképzelése. A hagyományos nyugati vallás gondolkodásában a világ teremtőjének fogalma Isten fogalma. Valóban, a világ teremtése „a semmiből" a vallás végső állítása, mert Isten az egyedüli szereplő. ... Egyedül Istennek van ilyen hatalma. ... A semmiből való pillanatszerű teremtés eszméje, vagyis a *creatio ex nihilo*, eredendően vallásos elképzelés.

Függetlenül a per megalapozottságától, és eltekintve az afféle kijelentésektől, hogy a „semmiből való teremtés" egyedülálló a nyugati vallásokban, az idézett töredék utolsó része lényegében tagadja a „semmiből való teremtés" tudományos kutatásának lehetőségét. Vallásos nézetként határozza meg, és „teremtéstudományként" sorolja be, a Teremtés Kutatásának Társasága és támogatóik terjesztette egyéb antievolúciós limlommal együtt. Sőt, Overton arra a következtetésre jut, hogy egyetlen ilyen „teremtéstudománynak" sincs semmiféle tudományos megalapozottsága vagy oktatási értéke. Végső fokon, mivel eredendően vallásos eszmék állami iskolákban nem taníthatók, a bíró kérlelhetetlen logikája látszólag kiöntené a gyermeket a fürdővízzel együtt, és megtiltaná a modern ősrobbanás-elmélet és a kvantumkozmológia tanítását az USA állami egyetemein.

Az idő természete

Vajh lenne csak világunk s időnk elég...

Andrew Marvell

A világegyetem időbeli kezdetére vonatkozó legújabb elgondolások tárgyalásakor az „idő" fogalmát könnyelműen használtuk. Feltételeztük, hogy az idő fogalmában nincs rejtett buktató, hogy jelentése semmiképpen sem kapcsolódik a világegyetem fejlődéséhez, amelyet időzít. Kimondatlanul feltételeztük, hogy ha az időt az Einstein tanította módon mérjük – olyan órával, amely

hozzánk képest nem mozog, és nincs kitéve eltérő gravitációs tér hatásának –, akkor jelentése egyértelmű. Az idő ilyenfajta mértéke az Einstein-féle „saját idő". Amikor azt mondottuk, hogy Hawking és Penrose szingularitástétele a világegyetem meghatározott idővel ezelőtti kezdetét jósolja, ezen azt értettük, hogy ez az idő annak az órának a véges számú „kettyenéseként" volna meghatározható, amelyet egy, a szingularitáshoz visszautazó „megfigyelő" vinne magával. S hasonlóképpen, ha egy összeomló világegyetem nagy összeroppanásába zuhannánk bele, akkor a velünk együtt zuhanó óra véges számú kettyenése után semmisülnénk meg. Amikor a világegyetem „koráról" beszéltünk, ezen azt az időtartamot értettük, melyet egy olyan megfigyelő mérne, aki együtt tágul a világegyetemmel a szingularitástól a mai állapotig. Einstein speciális relativitáselméletében azonban nincs semmi, ami megkövetelné, hogy a saját idő fogalma érvényes legyen a világegyetemre mint egészre, ahol a gravitáció elsőrendű fontosságú szerepet kezd játszani. Továbbá, jóllehet Einstein azt tanította, hogy a speciális relativitáselmélet világában (ahol a gravitációt elhanyagoljuk) az időnek nincs kitüntetett, abszolút mértéke, melynek révén a világegyetemben mindenki egyértelműen meg tudna egyezni az időre vonatkozóan, ez már nem igaz az általános relativitáselméletben. A relativisztikus kozmológiában létezik abszolút idő. Egy táguló világegyetemben például bárki meg tudná határozni a tágulás kezdete óta eltelt abszolút időtartamot, az anyagsűrűség lokális meghatározása útján. A „sűrűségóra" a kozmikus idő egyetemes és abszolút mértékét mutatja, amely az egymással kapcsolatba lépni sohasem képes időmérőknek azonos időskálát biztosítana az egész világegyetemben. Sok más kozmikus időt is el tudunk képzelni. A kérdés ez: „Melyik ezek közül – ha egyáltalán bármelyik – az alapvető kozmikus idő?"

Tegyük fel, hogy a világegyetem tágulása történetének időbeli visszafordítása révén visszafelé utaznánk az ősrobbanáshoz. Az út elején az időt karórával mérhetnénk. Előbb vagy utóbb azonban a környezet túl forró lenne ahhoz, hogy műanyagok, fémek, sőt még maguk az atomok is létezzenek (és persze mi magunk is, de az írói szabadság megengedi, hogy apróbb részleteket elhanyagoljunk). Az időt az atommagok rezgése alapján kellene mérnünk. Egy idő után azonban az atomok az őket alkotó elemi részecskékre törnének szét. Minden elemi részecskékből vagy anyagból összetevődött materiális szerkezet szétfoszlana egy idő után, amint a szingularitáshoz közeledünk. Minden, ami létezik, nulla térfogatba lenne összenyomva. Miféle értelmet tulajdoníthatunk az „időnek" egy ilyen környezetben, ahol a mérésre nem állnak rendelkezésre anyagból készült „órák"? Úgy látszik, van egy természetes módon adódó órajelölt: a tér és idő geometriájának görbülete. Ez mindenhol jelen van. Addig

létezik, amíg a világegyetem, és mértéke elkerülhetetlenül változik a világegyetem időbeli fejlődése során. Olyan „óra" ez, mely a világegyetem geometriájának változását méri, s nem kötődik semmiféle ember alkotta szerkezethez. Független a megfigyelőktől, de megfigyelők fel tudják használni az egyetemes idő meghatározására. Ez mind nagyon szépen és jól hangzik, de van-e bármiféle alapvető jelentősége?

Amint visszafelé haladunk a szingularitáshoz, a görbület és a sűrűség valószínűleg végtelen naggyá válik, és a hagyományos, valódi idő mérése szerint véges időtartamokat „görbület"-óránk végtelennek fogja mérni. Most képzeljük el, hogy van egy információfeldolgozó készülék (egyfajta gravitációs Maxwell-démon), amely az idő görbületét érzékeli. Vagyis úgy érezné, hogy saját szubjektív, avagy pszichológiai ideje a görbületi idővel összhangban folyik. E lény szubjektív ideje szerint végtelen hosszú időtartam lenne szükséges ahhoz, hogy ténylegesen elérje a szingularitást. S ehhez hasonlóképpen, egy zárt, összeomló világegyetemben a fenti lénynek a görbületi idő végtelen hosszú szakaszára volna szüksége ahhoz, hogy a világegyetem végéhez eljusson. Örökké élne saját, szubjektív idejében. Az örökké táguló világegyetem távoli jövőjében a helyzet ellentétesre változik. Itt a saját idő szerint élő megfigyelőnek végtelen jövője van, de a görbületi idő szerint mérve az csak véges hosszúságú, ha a világegyetem a globális egyöntetűség állapota felé halad. Szubjektív ideje ekkor a világegyetem tágulási sebességének csökkenésével összhangban le fog lassulni.

A görbületi idő eszméjének lényege az, hogy az időnek csak akkor van értelme, ha valami történik. Az idő az események megtörténésének sebességét méri. A gyakorlatban az idő számos eltérő jellegű irányítottságának vagyunk tudatában. Szubjektív elképzelésünk az idő múlásáról lehetővé teszi számunkra a múlt és a jövő megkülönböztetését cselekedeteinkben. A termodinamikában azt találjuk, hogy a jövőt az entrópia növekedésének iránya határozza meg. Az időnek még sokféle más irányítottsága létezik, amelyeket felhasználhatnánk.

Ha a világegyetem kezdetét egy múltbeli végtelen hatáskörébe akarjuk utalni, akkor valamilyen bizonyítékot kell találnunk arra, hogy valóban létezik egy görbületi óra, melynek „ketyegése" fizikailag megfigyelhető, valóságos jelenségeknek felel meg. Egyébként azt kockáztatjuk, hogy pusztán megismételjük Zénón végtelenségi paradoxonját, mely szerint a szingularitást sohasem érhetjük el, mert mindig meg kell feleznünk a még hátralévő időtartamot. Ezt a buktatót azonban el tudjuk kerülni. Az Einstein egyetemes gravitációs elméletéből kikövetkeztetett, legáltalánosabb típusú világegyetem igen különleges módon viselkedik, amikor a múltbeli szingularitásig követjük visszafelé. A szingularitást véges hosszúságú valódi idő alatt eléri, de útközben

végtelen számú oszcilláció megy végbe, amelyek a tágulás sebességét különböző irányokban, eltérő mértékben és kaotikus módon változtatják meg. Ezek a rezgések mind elkülönülő, fizikailag valóságos események. Ha egy ilyen világegyetem korai szakaszaiban létezhetnénk, akkor ezeket az eseményeket egytől egyig észlelhetnénk. E rezgéseket az okozza, hogy a világegyetem görbülete minden irányban más és más. Így tehát végtelen számú fizikailag elkülönült, egymást követő esemény történik a saját idő egy véges szakaszában. Ha a világegyetem oszcillációját tekintjük a görbületi órának, akkor végtelen hosszú múltbeli időtartam szükséges a szingularitás eléréséhez. A dolgok ilyetén állásáról többet fogunk majd mondani a 6. fejezetben.

Látjuk, hogy az idő jelentése még a nem kvantumos jellegű fizikában is alapvető kozmológiai talányokat idéz elő. Ha egy kvantumkozmológiát akarunk kidolgozni, nehéz elképzelni, hogy az idő fogalmát hogyan is vezethetnénk be. A kvantumelméletben az idő különleges helyzetet foglal el, ami ahhoz vezet, hogy eltűnik a kvantumkozmológia matematikai leírásából. Az idő problémája a kvantumkozmológiában jelen pillanatban még rejtély.

Hová lett a sok dimenzió?

Kis törvény fölé mindig nagyobb mered,
A roppant erő belőle fakad,
De talánya is nagyobb, beismered,
S így a falat a torkodon akad.

Ismeretlen szerző

Az elemi részecskék belső terére irányuló kutatások felderítése során láttuk, hogy jelentős indokaink vannak azt gondolni, hogy a térnek sokkal több dimenziója létezik, mint az a három, amelyben élünk. A további dimenziók bevezetése megtérül azáltal, hogy megengedi a természet alapvető törvényeinek egyesítését a nagyon nagy energiák tartományában. Amikor ezen elképzelés kozmológiai következményeit kezdjük feltárni, szembekerülünk egy rejtvénnyel. Ahhoz, hogy a természeti törvények ellentmondásmentes egyesítését elérjük, és ugyanakkor megmagyarázzuk a világegyetem nyilvánvalóan háromdimenziós jellegét most és történetének mindazon szakaszaiban, amelyekre nézve közvetlen vagy közvetett bizonyítékaink vannak, az szükséges, hogy az extra térbeli dimenziók e szakaszokban végtelenül kicsinyek legyenek. Ha a világegyetem az összes tíz vagy huszonhat dimenzióban kezdte el tágulását, akkor valaminek történnie kellett, ami három kivételével az összes többi dimenzió végtelen kis méretűre való felgöngyö-

lését eredményezte. Még nem tudjuk, hogy ez hogyan történhetett, és azt sem, hogy miért éppen *három* dimenzió részesült különleges elbánásban (nem pedig, mondjuk, öt vagy hét). A fenti problémát először felhívásnak tekintették arra, hogy az extra dimenziók mikroszkopikus méretekbe való bezárását megmagyarázzák, de ma már felismerjük, hogy e dimenziók kicsiny mérete természetes összhangban van a gravitációs erő hatásával. A legnagyobb rejtély ma az, hogy milyen módon tudott közülük három elszökni, és 15 milliárd fényév méretűre tágulni – mintegy 10^{60}-szor nagyobbra, mint a többiek. Mintha a „felfúvódás" folyamata hatást tudott volna gyakorolni a tágulás három irányára, de a többire nem. Talán ez a nyitja annak, ami történt. Nem tudjuk. Létezhetnének olyan természeti törvények, amelyek megszabják az óriási méretre táguló dimenziók számát, de az is lehet, hogy ez az alapvető fontosságú szám pusztán a „véletlen" műve.

5

Miért matematikai természetűek a természeti törvények?

Hasonlatok nélkül a modern fizika nem mond semmit a tömegeknek.

C. S. Lewis

Egy rejtély

A filozófia abban a nagy könyvben van írva, amely nyitva áll mindenkor szemeink előtt: az univerzumra gondolok; de nem olvashatjuk mindaddig, míg meg nem tanuljuk a nyelvét, és nem barátkozunk meg a jelekkel, amelyekkel írva van. A matematika nyelvén van írva, és a betűi háromszögek, körök és más geometriai alakzatok, amelyek ismerete nélkül lehetetlen egyetlen szót is megérteni.

Galilei
(Ford. Simonyi Károly)

Galilei fent idézett, 1623-ban írt szövege egy alapvető fontosságú tényt ismer fel: a természeti törvények matematikai jellegét. Nem szükséges őket ezen a nyelven kifejezni, de valahogyan e nyelv finom árnyalatai számtalan módon alkalmazhatók a kísérleti tényekre. Azt találjuk, hogy a természeti jelenségeket legmélyebben és legkimerítőbben a matematikai formulák írják le. Miért kell ennek így lennie? Mond-e ez valami fontosat a világegyetem belső logikájáról – azt, hogy „Isten matematikus" –, vagy csak tudatunk visszatükröződése a világegyetem rendezettségének leírására általunk választott közegben? Elképzelhető-e másrészt, hogy a természetnek van valamely eredendően matematikai vonása, de ez teljes információtartalmának csak töredéke, ámbár a számunkra egyedül megbízhatóan hozzáférhető része? Matematikai jellegű-e a valóság, vagy a matematika csupáncsak a valósághoz legközelebb álló dolog, amelynek megszerzése számunkra még kivihető? A fenti alternatívák tartalmának feltárása érdekében meg kell majd vizsgálnunk a matematikára vonatkozó, jelenleg versengő elképzeléseket. Bizonyos értelemben e

nézetek hasonlítanak az 1. fejezetben körvonalazott filozófiai álláspontokhoz, de vannak egyéb, váratlan elemeik is.

Annyira hozzászoktunk ahhoz a rendkívüli tényhez, hogy a természet jelenségeinek lefolyását papírdarabra írt piciny krikszkrakszok segítségével meg tudjuk jósolni, hogy talán már nem is kelt mély benyomást bennünk. Megértjük azonban, hogy valami matematikához hasonló dolog – egy olyan nyelv, melynek saját formáját és irányát korlátozó, beépített logikai szerkezete van – szükséges, bár nem elégséges a természeti törvények kifejezésére. A matematika lehetővé teszi, hogy egyértelműen, értékítéletektől mentes és kultúráktól független módon állítsunk dolgokat. Hipotéziseket csak akkor lehet összehasonlítani, illetve kísérletekkel vagy megfigyelésekkel ellenőrizni, ha azokat ilyen pontosan lehet kifejteni. A tudománynak, hogy számottevően fejlődhessen, ilyenfajta nyelvet kell használnia. A matematikai nyelv lehetőséget ad arra, hogy az egyedi problémák elemzéséből egyértelműen kizárjuk a lényegtelen dolgokat. Ezenkívül lehetővé teszi a felesleges gondolkodás elkerülését azáltal, hogy *ab initio* bizonyos logikai konzisztenciát épít be a matematikai formalizmusba, s így bizonyosak lehetünk abban, hogy a logika érvényes lesz minden esetben, amikor a formalizmust alkalmazzuk. A közönséges nyelveknek nincsenek ilyen előnyös tulajdonságaik. Az, hogy egy angol mondat nyelvtanilag helyes, az égvilágon semmit sem mond a mondat állításának belső konzisztenciájáról vagy igazságáról. A leghatásosabb írók közül néhányan munka közben figyelmen kívül hagyják az alapvető grammatikai szabályokat, és így személyes irodalmi stílust teremtenek. A matematika nem enged meg efféle írói szabadságot. Belső logikáját tisztelni kell, különben semmiféle célt nem szolgál. Egyes esetekben van valamelyes szabadságunk, hogy megszabjuk, mi legyen ez a logika, de ha egyszer már eldöntöttük, akkor szabályainak megsértése egyenértékű a játék elvesztésével.

A matematika a természet kifejezésének és magyarázatának egyik módja. Ebben az értelemben felületesen hasonlít sok misztikus vallásra, de különbözik, mondjuk, a buddhizmustól, abban, hogy szimbólumai és azok jelentései egyértelműek. Nem függenek sem attól, hogyan értelmezi jelentésüket a befogadó személy, sem pedig attól, hogy más fogalmakhoz milyen eszmetársításokat kapcsol. A matematika szimbólumai sérthetetlen kölcsönös viszonyokra épülnek.

A mindennapi életben gyakran megkövetelik, hogy bizonyos fogalmak vagy leírások egyértelműek legyenek, de általában kerüljük a matematikai szimbólumok igénybevételét, vagy új szavakat definiálunk, vagy – ami gyakoribb – közönséges szavaknak pótlólagos, technikai értelmet adunk (így például az előző fejezetekben ezt tettük olyan közönséges kifejezésekkel, mint az

infláció, erő, munka, információ és mag). Amikor azonban a tudományban tesszük ezt, akkor a technikai kifejezéseket matematikailag definiáljuk, és a szavakat a továbbiakban a pontos matematikai fogalmak rövidített formájaként használjuk. Ennek érdekes szociológiai következményei vannak, amelyek kétségkívül ösztönző hatást gyakoroltak a társadalmunkat megosztó „két kultúra" nézetének támogatóira. Míg az átlagos matematikus vagy tudós általában olvas regényeket, addig a hivatásos író, nyelvész, színész vagy zenész többnyire viszonylag kevés tudományos ismerettel rendelkezik, és ez irányú érdeklődése is lanyha. A fő ok gyakran a sajátos nyelv – a matematika – állította korlát, amely nyelven a tudomány „költeményeit" írják, nem pedig a technika iránti érdeklődés beteges hiánya. A művészetek értékeléséhez az érzékek szükségesek, és élvezetük – legalábbis részben – lehetséges a nyelv új formájának mélyreható ismerete nélkül. A tudományos ismeretterjesztés gyakorlatilag a matematikai elképzelések újrakifejezése a mindennapi nyelv szavaival, valamint szemléletes hasonlatok hozzáértő használata az absztrakt fogalmak és összefüggéseik kifejezésére ismerős, nem matematikai természetű dolgokkal.

Mi a matematika?

> A matematikusok olyanok, mint a franciák: bármit mondasz nekik, nyomban lefordítják a saját nyelvükre, és voilà! az már teljesen más.
>
> Goethe

Nem könnyű megmondani, hogy mi a matematika, de ha bárkitől megkérdezzük, akkor a legvalószínűbb válasz az, hogy „felismerem, ha látom". A leginkább feltűnő dolog a matematikával kapcsolatban az, hogy nagyon különbözik a tudománytól, és ez tovább bonyolítja azt a problémát, hogy miért olyan sikeres a világegyetem működésének leírásában és előrejelzésében. Míg a tudomány olyan, mint egy állandóan újraírt, szerkesztett és kiegészített, hosszú szöveg, a matematika teljes mértékben összegeződik. Korunk tudományáról bebizonyítják majd, hogy helytelen, de matematikájáról nem. A múlt tudósainak gyerekes és hibás elképzelései a fizikai jelenségekről megalapozottak voltak annak a civilizációnak a keretében, amelyben éltek, de helytelen matematikai eredmények igazolása sohasem lehet indokolt. Arisztotelész mechanikája hibás, míg Eukleidész geometriája igaz volt akkor, igaz most, és mindig igaz marad. A helyes és helytelen különböző dolgot jelent a tudomány-

ban és a matematikában. A tudományban a „helyes" azt jelenti, hogy összhangban van a valósággal; a matematikában azt, hogy logikailag ellentmondásmentes.

Mielőtt bármiféle következtetést vonnánk le abból, hogy szerencsénkre a matematika olyan jól írja le a valóságról nyert tapasztalatainkat, bizonyos mértékig meg kell értenünk, hogy a matematikusok szerint mi a matematika, vagy legalábbis mi lehetne. Tanultunk valamennyi matematikát, papírra tudunk firkantani „helyes" matematikai képleteket: de mi az, ami helyessé teszi őket?

A matematikának lényegében négyféle értelmezése létezik, ez az, hogy melyiket fogadjuk el, nagymértékben meg fogja határozni, hogy a matematikának a természet leírásában mutatott figyelemreméltó hatékonyságát miképpen értékeljük. Megfordítva, a matematika természetes alkalmazhatósága a tapasztalatok világára koronatanúként szerepelhet, amikor a matematika különböző, egymással vetélkedő értelmezéseinek előnyeit és hátrányait mérlegeljük. Minden értelmezés egy lehetséges felfogás arra vonatkozóan, hogy mit jelent az a kijelentés, hogy egy matematikai állítás igaz. A négy alternatívát *platonizmus*, *konceptualizmus*, *formalizmus* és *intuicionizmus* néven fogjuk emlegetni. Életrajzuk az alábbi:

Platonizmus: E nézet szerint a matematikusok felfedezik, nem pedig megalkotják a matematikát. Az összes felfedett és hasznos fogalom, így a csoportok és halmazok, a háromszögek és pontok, a végtelenek, sőt még a számok is, valóban léteznek „ott kint", tőlünk függetlenül. Matematikai mennyiségek akkor is volnának, ha nem lennének matematikusok; nem az emberi elme alkotásai, hanem a valóság eredendő tulajdonságainak megnyilvánulásai. A „π" tényleg ott van fönt az égben. Ezek a matematikai objektumok nem az általunk tapasztalt térben és időben léteznek. Absztrakt létezők, a matematikai igazság pedig azt jelenti, hogy emez absztrakt objektumok tulajdonságai és a mi szimbólumrendszerünk között megegyezés mutatkozik.

Platónnak e nézettel való kapcsolata meglehetősen egyértelmű számunkra, hiszen a platóni ideális formákat a 2. fejezetben már tárgyaltuk. A matematikai ideákat, mint például a „7"-es számot, e nézet anyagtalan, változhatatlan dolgoknak tekinti, amelyek valójában egy absztrakt birodalomban léteznek, míg a mi megfigyeléseink csupán sajátos és másodlagos megnyilvánulásai ezeknek az eszméknek, mint például hét törpe, hét menyasszony vagy hét testvér.

Ezen az alapon a matematikai objektumokat a más világok idegen lényeivel való kapcsolatteremtésre használhatnánk, és bizonyosak lehetnénk abban, hogy ők sok esetben ugyanazokat a matematikai struktúrákat fedezték fel, mint mi.

Szinte bizonyos, hogy a matematikai objektumok kifejezésére nem ugyanazt a nyelvet és szimbólumokat használnák, mint mi, de ennek ellenére elvárhatnánk, hogy ugyanazokat az ideákat fejezzék ki, éppoly egyértelműen, mint ahogyan a „seven", „sieben" és „sept" szó ugyanazt az információt hordozza az angol, német és francia nyelvet beszélők számára. Ezt nem mondhatjuk el az emberi tapasztalat semmilyen más területéről. Művészetünk és etikánk, kormányformáink és irodalmi stílusaink érthetetlenek lennének idegen lények számára, mert nem a tudatunktól független dolgokat írnak le. A platonisták bizalommal használnák a matematikát egyetemes nyelvként, mert azt valamilyen éteri és abszolút dolog leírásának tekintik. Azt tehát, hogy a matematika miért képes ilyen pontosan megragadni a természet működését, annak tulajdonítanák, hogy a természet *tényleg* matematikai jellegű, és valójában a természet matematikánk alapvető forrása. Annak ellenére, hogy idealisták, a matematika platonistái gyakran realistának tartják magukat, pusztán azért, mert ők hirdetik a matematika legegyenesebb, legnyíltabb értelmezését. A matematikát abszolút igazságnak tekintik: „Isten matematikus", bárhogyan definiáljuk is Istent.

Mindez egy „neoplatonizmusnak" gúnyolt misztikus oldalhajtás kialakulásához vezetett, melynek egyik szovjet hirdetője a matematikát egy kozmikus szimfónia egymástól független szerzők általi komponálásához hasonlította, melynek során mindegyikük valamilyen hatalmas, végső szintézis felé tereli a közös művet. Ez a cél – állítja – nem lehet olyan közönséges dolog, mint a világ leírása vagy a matematika gyakorlati problémák megoldására való alkalmazása. Minősége nem lehet evilági, hiszen különböző kultúrákban munkálkodó matematikusok egymástól független felfedezései oly gyakran bizonyulnak azonosnak. Kevés hivatásos matematikus vonna le azonban efféle kozmikus következtetést. Legtöbben úgy végzik munkájukat, mintha a platonizmus igaz volna, és új matematikai struktúrák „felfedezésére" törekednek, amelyek érdekesek, mert gazdag a belső tartalmuk, és váratlan kapcsolatot mutatnak a matematika más, első látásra független ágaival. Az „egzisztencia"-bizonyítékok emlegetése egyes matematikai objektumokkal kapcsolatban ennek a nem tudatos hozzáállásnak a tükröződése. Ha azonban a tiszta matematika művelőit arra sarkallnánk, hogy védjék meg ezt a józan megközelítést, kevesen vállalkoznának rá. Másrészt az alkalmazott matematikusok és a matematika más „fogyasztói" (például a fizikusok és gazdaságkutatók), akiknek a matematikát mások szállítják, „készen csomagolt" formában, e tudományt általában hasznos „fekete doboznak" tekintik: számtalan múltbeli sikere miatt ígéretes eszköznek, melynek segítségével sajátos problémákat oldhatnak meg.

Konceptualizmus: Ez a felfogás a platonizmus szöges ellentéte, és inkább társadalomtudósok, semmint matematikusok és természettudósok körében népszerű, mely utóbbiak közül a legtöbben ösztönösen elvetnék. A konceptualizmus képviselői szerint először matematikai struktúrák, szimmetriák és mintázatok sorozatát hozzuk létre, és aztán a világot ebbe az öntőformába kényszerítjük, mert olyan meggyőzőnek találjuk. Végső fokon az, hogy milyen formájú matematikát választunk, kulturális tényezőktől függ. A matematikát megalkotjuk, nem pedig felfedezzük. A matematika az, amit a matematikusok csinálnak. Az a gyanú, hogy van némi igazság ebben a nézetben, fokozatos és gyakran észrevétlen eltolódáshoz vezetett abban, hogy az alkalmazott matematikusok milyen módon írják le, amit csinálnak. Míg előző korok klasszikus matematikusai tanulmányokat írnának vagy előadást tartanának „X dolog matematikai elméletéről", manapság egyre nagyobb hangsúlyt kap a kevésbé fenséges „matematikai modellezés" kifejezés. Ez szemlélteti azt a tényt, hogy a konceptualisták nem tekintik a világegyetemet eredendően matematikai jellegűnek: Isten nem matematikus, de amit tesz, azt elég pontosan le lehet írni matematikai „modellekkel". A matematika teljes egészében az emberi elme terméke. A konceptualisták nem hisznek abban, hogy saját matematikai fogalmaink segítségével kapcsolatot teremthetünk az Androméda-galaxis lakóival.

A fenti nézőpontnak jelentős következményei lehetnének a fizikát illetően. Úgy érvelhetnénk például, hogy úgynevezett természeti állandóink (olyan fizikai mennyiségek, mint például Newton *G* gravitációs állandója), amelyek matematikai egyenleteinkben mint elméletileg meghatározatlan arányossági tényezők jelentkeznek, pusztán a jelenség leírására választott adott matematikai kifejezési mód művi termékei. Ilyen értelemben a „*G*"-t kulturális alkotásnak tekintjük. Hajlamunkat tükrözi a természeti jelenségek bizonyos módon való kifejezésére. A gondolkozás belső kategóriáiról vallott kanti nézeteknek is megfelel, melyek szerint összes tapasztalatunkat a tudat rendszerezi. Függetlenül attól, hogy „a dolog önmagában" matematikai jellegű-e (ahogyan a platonisták hiszik), vagy sem, nem tapasztalhatjuk meg semmilyen más módon, mint matematikailag. Így tehát tudatunk matematikai eszméket vetít tapasztalatainkra. Ez az érvelés megmutat valamit abból a platonizmussal ellentétes meggyőződésből is, hogy a kulturális elemek teljesen megszabják a természetre vonatkozó matematikai tapasztalatainkat, mert a természet evolúciós alkalmazkodásunk folyamán véste tudatunkba a matematikát. Képességeinket az absztrakt szimbólumok képletekbe foglalására, valamint arra, hogy műveleteket végezzünk velük, akkor élesítettük leghatékonyabban, amikor e tevékenység a valós világban ténylegesen létező dolgokon alapult. Az

utóbbi nézetnek messzeható következményei vannak, mert azt foglalja magában, hogy matematikánkat tapasztalataink alakították. Ha ez így van, akkor nem szabad azt várnunk, hogy érvényes marad, amikor a mindennapi emberi tapasztalon kívüli, újonnan felfedezett jelenségekkel kerül szembe. Mondhatnánk azt, hogy a fizika világának számos oldala – akár a csillagászatban, akár a részecskefizikában – szokatlannak bizonyul méreteiben, de nem a reá vonatkozó matematikai gondolkodást illetően, így nem kell feltétlenül különösebb jelentőséget tulajdonítanunk annak, hogy evolúciósan kialakult emberi matematikai érzékünk megfelelő leírásukat adja. Vannak azonban olyan területek, ahol semmiféle evolúciós esemény nem alakíthatta ki a szükséges fogalmakat; a kvantumvalóság 3. fejezetben ismertetett különös tulajdonságai talán azt jelzik, hogy nem csak fizikai elméleteinket kell tökéletesítenünk, ha a mikrovilággal akarunk foglalkozni. Valójában lehetséges, hogy még csak nem is a matematika az a nyelv, amely a legtermészetesebb módon írja le az eseményeket. Azzal a lehetőséggel kapcsolatban is végeztek vizsgálatokat, hogy a klasszikus logika (amelyben az állítások vagy igazak, vagy hamisak) esetleg nem alkalmazható kvantumszinten, hanem egy háromértékű „kvantumlogika" helyettesíti, amely megengedi a „meghatározatlan" logikai státus hozzárendelését eseményekhez; egy állításnak tehát, amelyik nem igaz, nem kell szükségképpen hamisnak lennie. Ily módon más választ adhatunk arra a kérdésre, hogy „melyik résen ment át a részecske a kettősrés-kísérletben?". Lehetséges azonban, hogy a kvantumvalóság problémáinak megoldása sokkal gyökeresebb ennél. Talán más típusú leírást igényel: egy új nyelvet, amely azt nyújtja a logikának, amit a logika nyújt a matematikának.

A konceptualizmus az antirealizmus egy formája, amely a mélyben rejlő szilárd valóság elméleti leírásai ellen irányul, nem pedig létezésének ténye ellen.

Biztos, hogy felfedezhetünk sajátos, kulturális eredetű hangsúlykülönbségeket abban, ahogyan a matematikát művelték és művelik ma is. Az angol stílus elveti a pusztán az eleganciáért bevezetett általános formalizmust, az alkalmazások felé hajlik, és a gyakorlati problémák megoldásának igénye sarkallja. A franciák, ezzel ellentétben, vonzódnak a formalizmushoz és az absztrakcióhoz, amint ezt a Bourbaki-csoport enciklopédikus programja reprezentatív példaként mutatja. Vajon e nemzeti stílusok létezése ártalmatlan semmiség csupán, vagy az egész emberi matematikát eltorzító, mélyen gyökerező szubjektivitást jelzi, és így megszabja, hogy milyen lehetséges törvények és magyarázatok állnak a tudósok rendelkezésére, ha a természetet akarják leírni?

Formalizmus: A következő „izmus" fő vonalaiban a századforduló táján alakult ki. A logikával foglalkozó kutatók számos zavarba ejtő logikai paradoxont fedeztek fel, és kimunkáltak olyan matematikai bizonyításokat, melyek bizonyos objektumok létezését állapították meg, de nem adtak módot arra, hogy ezeket véges számú lépésben fejezzék ki (ebben az értelemben a fenti objektumok azokhoz a megengedett konfigurációkhoz hasonlatosak, amelyek John Conway „Élet" nevű táblajátékán szerkeszthetők meg, de egyetlen kiindulási alakzatból sem lehet véges számú lépésben eljutni hozzájuk). E logikai konstrukciók a végtelen számú objektumot tartalmazó halmazok tulajdonságainak következményeiként jelentek meg, amikor azt feltételezték, hogy a végtelen halmazokra ugyanaz a közönséges logika érvényes, mint a végesekre (mint például az a feltevés, hogy egy halmaz vagy rendelkezik egy adott tulajdonsággal, vagy nem). Egyes matematikusokat nyugtalanított az ezen a hiten alapuló eljárás, mert a végtelen halmazok fizikailag nem valósíthatók meg. A kételyekre válaszul David Hilbert egy programot javasolt, hogy kiküszöbölje az efféle kétértelműségeket. Formalista programjának alapfilozófiája a matematika ama definíciója volt, hogy az semmi egyéb, mint műveletek végzése szimbólumokkal, meghatározott módon. Az eredményként kapott papírépítménynek nincs semmilyen sajátos jelentése. A műveletek eredménye – ha helyesen hajtották végre őket – szükségképpen tautologikus állítások kiterjedt gyűjteménye: a logikai kapcsolatok szövevénye. Időnként használják a „modell" szót ebben a megközelítésben, de a konceptualisták szándékaitól eltérő értelemben: itt egy axiómacsoport „modellje" az azokat kielégítő fogalmak halmaza, amelyekre ennélfogva érvényesek az axiómákból levezethető, eredményként kapott tautológiák (ezeket tételeknek nevezzük). A figyelem az objektumok közti összefüggésekre és az őket irányító szabályokra irányul, nem pedig arra, hogy van-e bármiféle eredendő jelentése azoknak az objektumoknak, amelyekkel műveleteket végzünk. A természet világa és a matematika szerkezete közti kapcsolat a formalisták számára teljesen lényegtelen. A fenti megközelítési mód egyik célja az volt, hogy ne kelljen nyugtalankodnunk a végtelen halmazokhoz hasonló nem intuitív objektumok *jelentése* miatt. A figyelmet a fogalmak összefüggésére irányította, nem pedig magukra a fogalmakra. A matematikai vizsgálódások egyedüli célja annak kimutatása, hogy axiómák egy adott csoportja ellentmondásmentes-e és így elfogadható kiindulási pont szimbólumok logikai hálózatának kiépítésére.

Az elmondottakból úgy gondolhatnánk, hogy Eukleidész volt a formalisták előfutára. Lehet, hogy utólag ez így látszik, de emlékeznünk kell arra, hogy ő a valós világ megfigyelésének absztrakciója révén alkotta meg axiómáit. Összes tételét szemléltetni lehetett pontok és egyenesek homokba rajzolásával és

szögek mérésével. A modern matematika nem követeli meg, hogy axiómái szemléletes vagy magától értetődő tulajdonságokkal rendelkezzenek. Elég pusztán annyi, hogy ellentmondásmentesek. A matematika ilyenfajta szemlélete – vagyis az, hogy egy sakkhoz hasonló logikai játék, bábok és szabályok listájával – ellentétes a platonizmus felfogásával, mert a matematikai szabályokat teljes egészében saját alkotásunknak tekinti. Nincs önálló jelentésük, csak összefüggéseikből fakadó. Ezeket az összefüggéseket pedig mi határozzuk meg a játékszabályok felállításával. Képletek léteznek: matematikai objektumok nem. A formalista számára a matematika alkalmazhatósága a természet leírásában érdekesség, aminek semmi köze a matematikához. Számára egy matematikai elméletnek csak akkor van értelme, ha nem jelent semmit.

Intuicionizmus: Ez az értelmezés szintén a nem intuitív fogalmak matematikai bizonyításokban való felhasználására adott viszonválasz volt. Elkerülendő a matematika kiterjedt részeinek arra a feltételezésre alapítását, hogy a végtelen halmazok is rendelkeznek a véges halmazok „nyilvánvaló" tulajdonságaival, azt javasolták, hogy csak az 1, 2, 3, ... természetes számokból véges számú logikai lépéssel előállítható mennyiségeket szabad bizonyítottan igaznak tekinteni. (Cantor végtelen halmazokkal kapcsolatos munkássága előtt a matematikusok nem használták ténylegesen a végtelen mennyiséget, csak kihasználták a tetszőlegesen naggyá vagy kicsinnyé tehető mennyiségek létezését – ez az eszme a lényege a Cauchy és Weierstrass által a XIX. században bevezetett „határérték" szabatos definíciójának.) Minden egyes logikai lépésnek egyértelműen meg kell határoznia a következő lépést. Emiatt ezt a nézetet *konstruktivizmusként* is emlegetik. Az „intuicionizmus" név azt az eszmét tükrözi, mely szerint csak a legegyszerűbb intuitív elképzeléseket szabadna használni. Bármit, ami kívül esik tapasztalatainkon, a legegyszerűbb alkotóelemekből kell felépíteni, intuitíve ismerős lépések sorozatával. Ez a megközelítési mód sokban hasonlít az operacionalisták 1. fejezetben ismertetett álláspontjához. Míg az operacionalisták a mérhető mennyiségekre korlátozták figyelmüket, hogy elkerüljék a kísérleti szempontból esetleg jelentés nélkülinek bizonyuló „nyilvánvaló" fogalmak (mint például az egyidejűség) bevezetését, addig az intuicionisták megtartják a „nyilvánvalót", nehogy olyasmihez jussanak el, ami minden jelentést nélkülöz.

Párhuzam vonható az intuicionisták céljai és a kvantumelmélet előző fejezetben ismertetett értelmezőinek céljai között. Bohr és az intuicionisták a matematikai és fizikai mennyiségek új értelmezését próbálták bevezetni, amely elválasztja e mennyiségeket a fizikai valóságtól. Egy kvantummérés eredménye a fizikai valóságra vonatkozó ismereteink mértékét tükrözi, míg egy matema-

tikai képlet, az intuicionisták szerint, csak a levezetéséhez végrehajtott számítások halmazát írja le. Nem fejez ki a számítások végrehajtásától függetlenül létező valóságot.

Az intuicionisták elvetnek minden olyan érvelést, mely egy dolog létezését anélkül bizonyítja be, hogy egyúttal receptet adna előállítására. Persze ha be tudjuk bizonyítani, hogy egy *véges* halmaznak létezik legalább *egy* speciális eleme, akkor bár ez az eredmény nem elfogadható az intuicionisták számára, azzá tehető az elemek véges halmazának átvizsgálásával a speciális elem tényleges azonosítása céljából (talán a matematikai lehetőségek számítógépes átrostálásával, mint a híres „négyszín-tétel" újkeletű bizonyítékának esetében). Ez egy elfogadott konstruáló eljárás. Ha azonban csak azt bizonyítanánk, hogy egy *végtelen* halmaznak van speciális eleme, akkor ezt az eredményt elfogadhatatlannak ítélnék, mert nem lehetne ellenőrizni konstruktív módon, számítógéppel végzett véges számú lépésben. Rendkívül érdekes, hogy Hawking és Penrose szingularitástétele (lásd előző fejezet), amely a tér és idő kezdetének létezését bizonyítja a világegyetem múltjában, amennyiben teljesül egy sor megfigyeléssel ellenőrizhető feltétel, *nem* elégíti ki az intuicionisták követelményeit. Megjósolja a téren és időn át vezető út (vagy utak) létezését, amely véges időtartamon belül elkerülhetetlenül véget ér, de nem konstruálja meg azt egyértelmű módon. A legtöbb, amit eddig tenni tudtunk, az az volt, hogy Einstein egyenleteinek olyan explicit megoldásait találtuk meg, amelyek kezdeti szingularitással rendelkeznek. Azok a megoldások azonban, amelyek megtalálásához ez idáig elég okosnak bizonyultunk, meglehetősen sajátos esetek.

A konstruktivista megközelítés korai és lelkes támogatói, mint Kronecker és Brouwer, a matematika egészének újraalkotását javasolták konstruktív alapon, a végtelen halmazokhoz hasonló nem intuitív elemek mellőzésével. Nem meglepő, hogy ezt a túlságosan pozitivista javaslatot nem fogadta kitörő lelkesedés. Megtizedelte volna a matematikát (mindannyian emlékszünk arra a lehangoló érzésre, amikor valaki azt javasolta, hogy teljesen írjuk újra iskolai vagy tudományos dolgozatunkat). Hilbert meg volt győződve arról, hogy Brouwer programja, még ha sikeres volna is, katasztrófához vezetne. Azt állította, hogy mire a konstruktivisták végeznének a matematikával, „a modern matematika hatalmas kiterjedéséhez képest mit jelentene az a szánalmas maradék, néhány elszigetelt, hiányos és egymással össze nem függő eredmény, amelyet az intuicionisták elérnének".

Brouwer dogmatikus megközelítési módja valóban elég nagy csetepatét okozott a matematikában. Ő volt az akkori vezető matematikai folyóirat, a német *Mathematische Annalen* egyik szerkesztője, és hadat üzent azoknak a

matematikusoknak, akik nem fogadták el konstruktivista filozófiáját: elutasított minden olyan közleményt, mely a végtelen halmazokhoz hasonló, nem konstruktivista elképzeléseket alkalmazott, vagy utálatának fő tárgyát, Arisztotelész tételét a „harmadik" kizárásáról, mely szerint egy állítás vagy igaz, vagy hamis – harmadik lehetőség nincs. Ám ez válságot okozott, amit a többi szerkesztő úgy oldott meg, hogy lemondtak, majd új szerkesztőbizottságot választottak – csak éppen Brouwer nem került bele! A holland kormány ezt híres polgáruk elleni sértésnek tekintette, és egy matematikai folyóirat alapításával válaszolt, amelynek szerkesztője Brouwer lett.

Gyakorlatilag az intuicionisták nem gondolták, hogy minden matematikai állítás vagy igaz, vagy hamis. Bevezettek egy harmadik lehetőséget is: az *eldönthetetlent*. Ez a háromértékű logika kissé hasonlít a skót bíróságok gyakorlatára, ahol az ítélet az is lehet, hogy „nem bizonyított", míg az angol bíróságokon megkövetelik a „bűnös" vagy „nem bűnös" ítéletek valamelyikét. Az „eldöntetlen" állapot azoknak a matematikai állításoknak jutott osztályrészül, amelyeket nem lehetett véges számú konstruktív lépésben bizonyítani.

Az intuicionisták nem fogadnak el érvényes érvelésként semmit, ami ehhez hasonló állításokkal kezdődik: „A π végtelen tizedestört kifejtésében vagy létezik egy 100 egymásra következő páratlan számból álló szakasz, vagy nem." A π ilyenfajta tulajdonságai az eldönthetetlen dolgok lomtárába valók. Ez a leszűkített logika törvényen kívül helyez egy klasszikus bizonyítási módot, a *reductio ad absurdum*ot is, mert már nem következik benne az, hogy valamely S állítás tagadásának a tagadása maga után vonja, hogy S igaz. Az intuicionisták tehát olyan logikával dolgoznak, melyből hiányzik az új állítások létrehozására szolgáló egyik leghasznosabb eljárás. Olyan ez, mintha egyik kezüket hátrakötve verekednének. Persze bármi, ami igaz ebben a leszűkített logikában, az a közönséges logikában is igaz lesz, de fordítva nem így van. Az intuicionisták sokkal szigorúbb követelményeket támasztanak a matematikai igazsággal szemben.

Kevés matematikus intuicionista, de újabban feléledt az érdeklődés e megközelítési mód iránt. A formalizmushoz hasonlóan az intuicionizmus határozottan nem platóni jellegű. A matematikát kitalált, nem pedig felfedezett dolognak tekinti. Sőt *emberek* által, intuitíve nyilvánvaló – de *számunkra* intuitíve nyilvánvaló – alapvető elképzelések egy csoportján végzett műveletekkel konstruáltnak. Míg a formalistákat nem zavarta a tényleges végtelenhez hasonló nem intuitív fogalmak jelenléte logikai levezetéseikben, addig az intuicionisták ezeket rendeletileg kizárták; mindkét filozófia elveti azonban – mint értelmetlent – a matematikusok nélküli matematika elképzelését. Az intuicionisták programjának nyilvánvaló hátránya, hogy tárgyköre nincs pontosan meghatározva. Nincs pontos definíció arra, hogy melyek is a

konstruktív módszerek. Nem tudjuk, hogy holnap nem hozakodik-e elő valaki olyan eredményekkel, amelyekről eddig azt hittük, hogy nem állíthatók elő véges számú lépésben. Ténylegesen a végtelen halmazok tulajdonságaira vonatkozó, először Cantor által bizonyított tételek, amelyek az intuicionista forradalmat eredetileg kiváltották, nemrég átkerültek a véges számú konstruktív lépésben bizonyítható tételek csoportjába.

Közvetett kapcsolat van az intuicionisták logikája és a természeti törvények kutatása között. A 3. fejezetben megtárgyaltuk a kvantumvalóság dilemmáját, valamint azt a kérdést, hogy a neutron „valóban" áthaladt-e az egyik vagy másik résen, illetve azt, hogy kíváncsiságunk ölte-e meg Schrödinger macskáját. A logikai patthelyzetet a valóság gyökeresen új elképzelésének az elfogadása oldotta fel. A kvantummérés rejtélyének egy másik megoldása az intuicionisták háromértékű logikájának, de nem az azt indítványozó konstruktivista módszertannak az elfogadása volt. Ebben az összefüggésben „kvantumlogika" néven emlegetjük. Így többé nem szükséges arra következtetnünk, hogy a neutron az egyik *vagy* a másik résen haladt-e át. Schrödinger macskája nem feltétlenül halott, ha nem él, és Bell tételét ezután már nem lehet bebizonyítani. Most már létezik egy harmadik, közbenső logikai állapot. A fenti kvantumlogika elfogadása adhat egyfajta „magyarázatot" a kvantumvilág különös voltára, de csak a minden másra érvényes logika feladása árán. A legtöbb fizikus ezt elfogadhatatlan szkizofréniának tartja. Végül is közönséges logikát kell használnunk ahhoz, hogy a kvantumlogika alkalmazását megindokoljuk.

Nincs mód annak eldöntésére, hogy a matematika fenti megközelítései közül melyik a helyes, melyik a helytelen. Vannak sokatmondó bizonyítékok egyesek mellett és mások ellen. A legtöbb, amit tehetünk, az az, hogy tudatosítjuk, miképpen befolyásolja egyik vagy másik nézet elfogadása a világegyetem szerkezetére vonatkozó következtetéseket. Fel kell ismernünk azt is, hogy az intuicionisták álláspontja a többiekétől némileg különbözik. Nem pusztán arra vonatkozó nézet, hogy mi a matematika, hanem próbálkozás arra is, hogy a matematikát merev, operacionális korlátok közé zárja. A megkövetelt definíció meglehetősen korlátozó jellegűnek látszik, és a konvencionális matematikánál jóval szűkebb tárgykört eredményez. Tudomásom szerint eddig még senki sem kísérelte meg kimutatni, hogy mi maradna meg a matematikai tudományokból, ha csak a matematika intuicionista tárházát tekintenénk igaznak. A három nem platóni nézet mindegyikének ki kell egyeznie azzal a ténnyel, hogy a matematika hatékony eszköze a természet leírásának. Miért derül ki oly gyakran absztrakt matematikai fogalmakról, amelyeket réges-rég alkottak és dolgoztak ki, látszólag bármiféle alkalmazás lehetősége nélkül, hogy kulcsfon-

tosságú elemek a fizikai felfedezések valamelyik új területének leírásában? Az alábbi képzelt párbeszéd, egy platonista matematikus és egy, a matematikát emberi alkotásnak tartó pályatárs között, bemutatja a két álláspont mellett és ellen szóló érvek némelyikét.

*

Mindig, amikor azt mondja, hogy a matematika csupán emberi alkotás, mint a sakkjáték, szeretnék hinni önnek. Ez a dolgokat részben megfosztaná rejtélyes voltuktól. De állandóan visszajutok ugyanahhoz a problémához. Miért van az, hogy a múltban felfedezett matematikáról oly gyakran kiderül, hogy leírja a világegyetem működését? Ugye, ez csak nem lehet véletlen?

Ez valóban nem véletlen. Amikor a természetet le akarjuk írni, az egyedül rendelkezésünkre álló eszközöket kell használnunk. Még az is lehet, hogy erre a célra van a matematikánál jobb nyelv. Matematikánk legnagyobb részét eleve a természetből vezettük le, így elég meglepő volna, ha nem tudnánk leírni vele a természetet.

Mi a helyzet Riemann geometriájával? Hiszen azt Riemann és mások a tiszta matematika egyik területeként dolgozták ki, jóval azelőtt, mielőtt Einstein kiderítette, hogy a téridő szerkezetét írja le.

Ez meglehetősen szerencsétlen példa. Tudja, Riemann azért vizsgálta a görbült felszínek geometriai tulajdonságait, mert érdekelte egy fölöttébb gyakorlati probléma: a felmelegített fémlemezek torzulása. A hatás nem különbözik különösebben a téridő tömegek és energia általi eltorzításától, legalábbis Einstein elmélete szerint. Valójában egyes fizikusok a felmelegített fémlemezt heurisztikus analógiaként használták, amikor Einstein elméletét a járatlanoknak magyarázták el.

Mi a helyzet a csoportok szerkezetével és a szimmetriákkal? Az elemi részecskék kölcsönhatásait, sőt magát az elemi részecskék *létezését* is matematikai szimmetriák szabják meg, amelyeket a csoportelmélet ír le. Az összes ilyen csoportot 100 évvel ezelőtt a tiszta matematikával foglalkozó kutatók fedezték fel és osztályozták, akiknek fogalmuk sem volt a modern fizikáról. És ezek a tulajdonságok ráadásul pontosan meghatározottak; azt jósolják, hogy adott számú, bizonyos típusú részecske létezik, és nem több. Nem arról van szó, hogy a matematika jó közelítést ad. Vagy helyes, vagy helytelen, és a tapasztalat azt mutatja, hogy többnyire helyes. Egyébként azt a feltevését is megkérdőjelezhetném, hogy ha a matematika valamely vonását a természetből

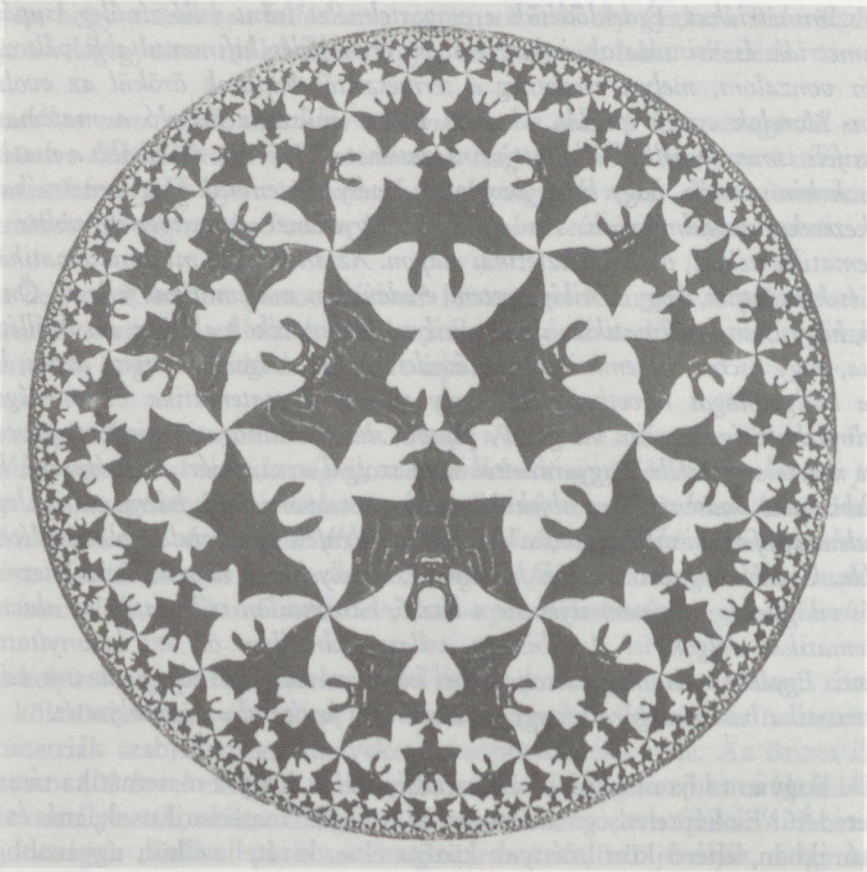
vezetik le, akkor az kulturális, illetve emberi eredetű. Azt gondoltam volna, hogy éppen ellenkezőleg. Ez éppen azt az elképzelést látszik megerősíteni, hogy a természet eredendően matematikai jellegű.

Azt gondolom, hogy a világ egyszerűen van. Nem tudom belátni, hogy miért kellene tovább mennem, és azt mondanom, hogy matematikai jellegű. És nem hiszem, hogy volna bármi különlegesen matematikai természetű a szimmetriákban. Ténylegesen a matematikusok és fizikusok voltak az utolsók, akik a szimmetriák fontosságát felismerték. Az építészek és a művészek sokkal korábban felismerték és értékelték jelentőségüket. A matematikusok a természetből vezették le a szimmetriákat. Érdeklődésük a csoportelmélet iránt valószínűleg csupán a szimmetriák és mintázatok iránti emberi érdeklődés kifinomultabb változata, olyan vonzalom, melyet eredetileg a természettől kaptunk örökül az evolúció során. Mondok egy jó példát. Maurits Escher műszaki rajzoló a matematika bármiféle ismerete nélkül alkotott mintázatokat (5.1 ábra), de később a matematikusok kimutatták, hogy képei bonyolult, mély matematikai szimmetriákat és szerkezeteket tartalmaznak. Az egész világegyetemet teremthették volna így, matematika nélkül, pusztán esztétikai alapon. Aztán jövünk mi a matematikánkkal, és kijelentjük, hogy a világegyetem eredendően matematikai jellegű. Ön azt hiszi, hogy Isten matematikus, de ugyanilyen bizonyítékok alapján azt is állította volna, hogy Escher matematikus: de tévedett volna. Megemlíthetném azt is, hogy az a hallgatólagos következtetése, mely szerint a matematika hasznossága és alkalmazhatósága a valós világban a platóni nézetet támogatja, kissé megtévesztő, mert nézete semmiféle magyarázattal nem szolgál arra, miért szükségszerű, hogy az absztrakt matematikai objektumok ama csoportjának bármi köze legyen mindennapi fizikai világunkhoz. Vannak mindenféle haszontalan platóni létezők, példának okáért egyszarvúak és kentaurok, amelyek úgy látszik, nem léteznek a valós világban; miért nem ilyen nem létező, haszontalan változatok az absztrakt matematikai dolgok is? Azt hiszem, válasz hiányában ön ezt bizonyítottnak tekinti. Egyébként is, még ha teljességgel képtelen volnék is magyarázatot adni a matematika hasznosságára, ez egy jottányit sem javítaná az ön helyzetét.

De hogyan tudja megvédeni azt az elképzelést, hogy a matematika társadalmi eredetű? Ez képtelenségnek látszik. Különböző matematikusok, más és más kultúrákban, eltérő körülmények között élve, kivétel nélkül, ugyanahhoz a matematikához jutottak el. Püthagorász tétele ugyanazt mondja, akár a görögök, akár az indiaiak vagy akárki más találta meg. Az igazság magvát tartalmazza, amely túlmegy az egyén előítéletein. Végül is a matematika tudományos nyelvként való alkalmazásának egyedüli oka pontosan az volt,

hogy kultúrától független, és nincs szubjektív eleme. Elismerem, hogy léteznek divatok, sőt még nemzeti stílusok is a matematikában, de ezek pusztán azt szabják meg, hogy a vizsgálatok milyen irányban haladnak, és milyen stílusban közlik az eredményeket. Azt nem határozzák meg, hogy melyik matematikai eredményt találják igaznak vagy hamisnak. Az ötös szám – prímszám, akár tetszik ez önnek, akár nem.

Szükségszerű, hogy a tudatunknak is legyen némi köze ehhez. Azt gondoltam volna, hogy ez elkerülhetetlen.



5.1 ábra. Maurits Escher 1958-ban készített, *Körhatár I.* című fametszete. Ez a kép a negatív görbületű, úgynevezett Lobacsevszkij-sík konformális leképezése. Az alkotás Escher és H. S. M. Coexter kanadai mértantudós kapcsolatának köszönhető, de Escher rajza vadonatúj szimmetriákat tárt fel, amelyeket a matematikusok csak néhány évvel később fedeztek fel

De ennek figyelmen kívül hagyása ártalmatlan egyszerűsítés. Ha ön ezt nem teszi meg, akkor végül a tudatunk által megismerhetetlen valóság tükörképét fogja tanulmányozni csupán. Hát akkor miért ne tekintenénk eredetileg is a tükörképet az egyedüli valóságnak? Ez az egyedüli valóság, ami számít.

Akkor azt állítja, hogy minden szubjektív?

Nem, én csak azt akarom feltételezni, hogy tudatunk nem torzítja el azt, ami ott kinn van a valóságban. Ön nem ezt teszi. Ez a dolog lényege.

Azt hiszem, ráébredünk majd, hogy ennél valamivel jelentősebb különbség van álláspontjaink között.

Ha, amint ön mondja, a matematikát kitaláljuk, nem pedig felfedezzük, akkor miért olyan nehéz megértenünk? Miért látszanak a halmazokhoz és csoportokhoz hasonló matematikai objektumok annyira jelentősnek, ha pusztán a tudatunkban felbukkanó mintázatok leírásai – valóban annyira jelentősek, hogy egyes tulajdonságaikat „igaznak" nevezzük? Önnek ugyanazzal a kellemetlen problémával kell szembenéznie, mint a szolipszistáknak. Ha minden a mi szubjektív alkotásunk, akkor egy részét miért olyan nehéz megértenünk, másfelől pedig az egésznek miért van oly kevés kapcsolata velünk?

A sakk emberi találmány, ez azonban nem segít azon, hogy képtelenek vagyunk nehéz sakkfeladványokat megfejteni. Ezek a dolgok gyakran legyőznek minket, mert nem vagyunk elég okosak, ennyi az egész.

Még mindig szilárd meggyőződésem, hogy a matematika teljesen különbözik a sakkhoz hasonló játékoktól. Vannak persze közös elemeik, de a matematika leírja, hogyan működik a világ, a sakk viszont nem.

Tegyük fel, hogy nézeteinket egy másik szimbolikus nyelvre vonatkoztatjuk, például a zenére. Egy Beethoven-szimfónia vajon alkotott vagy felfedezett dolog-e? Nincs olyan zenész, aki akár csak álmában is elfogadná azt a platóni nézetet, hogy a szimfóniát felfedezték. Az a zeneszerző alkotása. Személyiségének bizonyos vonásait testesíti meg. Miért különbözik ettől bármilyen módon a matematika?

Bár a zene szimbolikus nyelv, egy lényeges sajátságában különbözik a matematikától: nincs beleépítve hajlíthatatlan logika. A kompozíciónak vannak szabályai, de ezek áthágható szabályok. Ön azért tekinti Beethoven V. szim-

fóniáját alkotásnak, mert nem tudja elképzelni, hogy más is megírhatta volna, ha Beethoven nem teszi meg. De ha Püthagorász nem fedezte volna fel tételét, valaki más felfedezte volna. Ténylegesen fel is fedezte más! Rengeteg példát említhetnénk a többszörös felfedezésre: a művészetekben viszont nincs példa többszörös alkotásra. Newton és Leibniz egyaránt felfedezték a matematikai analízist. Gaussnak, Lobacsevszkijnek és Bolyainak látszólag ugyanazok a gondolatai támadtak a nem-euklideszi geometriáról. Nincs viszont két Hamlet! Ebben mutatkozik meg a különbség tudomány és művészet között. Az utóbbi alkotásai, mivel formájukban és tartalmukban szinte teljesen szubjektívek, szükségszerűen egyediek; mivel azonban a matematika egy már létező dolognak a felfedezése, egymástól független személyek azonos eredményre juthatnak és gyakran jutnak is.

Persze az a tény, hogy különböző személyek azonos matematikai eredményeket kapnak, felhozható lenne bizonyítékul azon nézet mellett, hogy a matematikát egyetemes emberi tulajdonságok határozzák meg, nem pedig sajátosan kulturálisak, de be kell vallanom, hogy ez kissé más álláspontnak látszik.

Ezzel egyetértek. Gyakran állítják, hogy az alapvető matematikai elképzelések az emberi tudat veleszületett képzetei. Poincaré a geometriákat és a szimmetriák folytonos csoportjait úgy tekintette, mint az emberi tudatban eleve adott fogalmakat. Valószínűleg a „szám" a legalapvetőbb intuitív fogalom, amelyet ilyennek tekinthetünk. Pszichológusok gyakran állítják, hogy a gyermekek előbb alkotnak absztrakt fogalmat, mondjuk a „3"-as számról, minthogy megértenék annak tényleges megjelenéseit, mint például három kismalac vagy három király. Újabban azonban a régészek figyelemreméltó felfedezéseket tettek, amelyek fényt derítenek arra, hogyan fejlődtek az absztrakt matematikai fogalmak az ókori sumer társadalomban. Úgy látszik, hogy i. e. 8000 körül a sumeroknak olyan kereskedelmi jelöléseik voltak, amelyek nem vették figyelembe a szám fogalmának egységességét. Két juhot megkülönböztettek két kecskétől, de nem voltak hajlandók különböző dolgokat összeadni. Számokat tartalmazó listáik mindig tartalmazták annak leírását, hogy a megszámlált dolgok mik voltak. I. e. 3100-ra azonban már kifejlesztették a megszámlált dolgoktól független számok fogalmát. Ekkor már voltak jelölések arra célra, hogy a dolgok számát megkülönböztessék a megszámlált dolgok milyenségétől.

Hogyan is lehetnének az olyan matematikai fogalmak, mint a „pontok", a végtelenül kicsiny mennyiségek vagy az irracionális számok bármi mások, mint tudatunk termékei? Végül is nem léteznek valójában, vagy igen? Ha ezek a

matematikai létezők „ott kint" léteznek, akkor hol vannak? Attól tartok, hogy az a hely nem lehet a mi világegyetemünk terében és idejében. Mondja meg, hogy a térnek hány dimenziója van, és én beszélni fogok önnek kétszer annyi dimenzióra vonatkozó térgeometriáról, még ha az nem létezik is.

Nem azt állítom, hogy a matematikai objektumok a mi világegyetemünk terében és idejében léteznek.

Úgy értsem ezt, hogy ezek a fogalmak tényleges példáiktól függetlenül léteznek?

Igen, de nem tudom, „hol" léteznek. Pusztán azt akarom állítani, hogy a világegyetem eredendően matematikai jellegű.

Éppen az előbb tiltakozott amiatt, hogy az érzékek árnyékvilágát teremtettem meg, a valóságtól egy lépésre. Most pedig ön teszi ugyanezt. Teremtett egy másik világot, az itteniben szükséges összes matematikai bútorzattal berendezve. Nemigen állíthatja, hogy a matematikai objektumok valóságos voltára vonatkozó nézetét alátámasztotta pusztán azáltal, hogy feltalálta a valóságos matematikai absztrakciók egy másik világát.

Az én másik világom egyedülálló, és megmagyarázza, hogy miért észleljük mindannyian ugyanazokat a matematikai struktúrákat, az ön más világaiból azonban annyi van, ahány matematikus, és ez határozottan különössé teszi, hogy mindannyian ugyanazt a matematikát találjuk meg, hacsak nem egyetlen, közös forrásból származnak.

Úgy látszik azonban, hogy a matematika hatékonyságára e világ működésének leírásában önnek sincs már magyarázata. Az ön matematikai létezői egy másik világ lakói, és meg kell magyaráznia, miért alakul éppen úgy, hogy leírják a mi terünkben és időnkben lejátszódó folyamatokat. És nem értem, miképpen állíthatja azt, hogy bármit is tud absztrakt világáról, még ha az létezik is. Elismeri, hogy ezek az absztrakt matematikai létezők nem a mi terünkben és időnkben üldögélnek, ennek azonban azt kell jelentenie, hogy nem is tudhatunk róluk. Nem kerülnek kapcsolatba emberi lényekkel, mert ismereteink a tér és idő világegyetemére korlátozódnak.

Nos, ezt a problémát talán csak az okozta, hogy korlátozott elképzelésünk van arról, mit jelent „tudni" valamiről. Egyáltalán nem állítom, hogy elképzelésem teljesen kidolgozott. Jelentős továbbfejlesztést igényel. És hozzá kell tennem:

megelégszem azzal az elképzeléssel, hogy a világegyetem pusztán csak *ilyen*, eredendően matematikai jellegű. Ezért el tudom kerülni az absztrakt létezők „más világainak" bármiféle említését. A matematika esetleg azonos lehetne azzal, amit ön annak nevez. Bár rejtélyesnek tartjuk, hogy a világot a matematika jól írja le, nem sok embert láttam azon meglepődni, hogy a világot a logika irányítja és írja le.

Lehet, hogy intelligens lények csak akkor létezhetnek, ha a világot a logika és a matematika irányítja?

Hohó! Azt az átkozott vastag, négyszögletes könyvet olvasgatta Biplertől és Tarrow-tól, vagy mi is a nevük. Tényleg elhiszi, hogy vannak más, a matematika által le nem írható világok? Még Everett sok világa is engedelmeskedik a kvantummechanika matematikájának.

Nem lehetetlen, hogy léteznek ilyen világok. De nem gondolom, hogy ez bármilyen irányban is eldönthetné vitánkat. Elég volna azt tudni, hogy miért írja le a matematika bármelyik világ szerkezetét.

Van valami, ami mindkettőnk számára nehézséget okoz. Gyermeteg módon mindketten úgy beszélünk a matematikáról, mintha egyetlen szó leírná az egészet – akármi legyen is az. Bár hiszek abban, hogy a természet – úgy, ahogy van – matematikai jellegű, nem gondolom, hogy azt állíthatnám, hogy az *egész* matematika szerepet játszik a természetben. Angolok lévén, talán kompromisszumot kellene kötnünk, és azt mondanunk, a matematika egy részét felfedezik, a többit pedig valamilyen módon az előbbiből találják ki és vezetik le.

Ez érdekes ötlet. Persze az én érvelésemet nem befolyásolja, de úgy veszem észre, hogy az önét részben aláássa, és azt a kellemetlen problémát veti fel önnek, hogy hol húzza meg a határvonalat a kétféle matematika között.

No persze, ön mi mást mondana! A valóságban, azt hiszem, ez megerősíti helyzetemet.

Úgy gondolja, hogy azért, mert megengedi az érvelését aláásó, nehézségeket okozó példák áttételét a nem platóni kategóriába? Én itt ennél rejtettebb problémát látok. Vegyük például a klasszikus mechanikát. A matematikát kétféleképpen használhatjuk az erők, mondjuk, a gravitáció hatása alatt mozgó részecskék

pályájának meghatározására: vagy differenciálegyenleteket használunk, és a jövőbeli helyzetet a jelenből, oksági alapon határozzuk meg, vagy a variációs elvet, amely a részecske által a valóságban leírt pályát úgy határozza meg, hogy minimalizál egy bizonyos, a kezdeti és végső állapotokat összekötő mennyiséget. A második megközelítési módban a jövő részlegesen meghatározza a múltat. Filozófiai szempontból egy világ választja el a két elképzelést, de matematikai szempontból teljesen egyenértékűnek bizonyulnak. Így a platonistáknak dilemmát okoz az, hogy eldöntsék, melyik az „igazi" a két leírás közül.

Vagy azt, hogy melyik a helyes. Lehet, hogy nem bizonyulnak teljes mértékben egyenértékűnek. Mellesleg, miért gondolják a matematikusok, hogy a matematika egyaránt „szép" és hasznos?

Vonzódunk bizonyos matematikai struktúrákhoz, mert elegánsak vagy „szépek". Ezen a matematikusok és a tudósok azt értik, hogy felületes sokféleségük ellenére mélyen rejlő egységről árulkodnak. Hatalmas, igen bonyolult logikai struktúrákká fejlődnek a legegyszerűbb kezdetekből, és látszólagos különbözőségük ellenére váratlan kapcsolatokat mutatnak a matematika más ágaival. Azt gondolhatnánk, hogy éppen e struktúrák esetében lehet a legvalószínűbben gyakorlati alkalmazásokat találni a valós világban, pusztán azért, mert ezek alkalmazhatóságához szükséges a legkevesebb sajátos feltétel fennállása.

*

A fenti rövid vita felfedi azt a problémát, amely akkor lép fel, amikor meg szeretnénk határozni a matematika jelentését vagy a tudományos felhasználásban tanúsított különleges hatékonyságának okait. Van valami érzelmileg vonzó a platóni álláspontban. Oly csábítóan egyszerű magyarázatot kínál mindenre. Az ellene felhozott érvek azonban nagyon meggyőzőek. A párbeszéd utolsó, a különböző matematikákról szóló része a kulcsfontosságú. A matematikáról úgy is gondolkodhatnánk, mint valamelyik nyelvről, például az angolról. A kapcsolatteremtés célszerű módjaként keletkezik. Hasznos. Néha még új szavak alkotása is szükséges. Az alkalmazott matematika így kezdődik. De azután megjelennek a nyelvtantudósok, akik a gyakorlat egész ingoványát szilárd, logikai alapokra akarják helyezni, építményüket a tetőnél kezdve kialakítani. Ez részben sikerül is nekik. Majd írók és költők jelennek meg, akik magát a nyelvet szeretik. Nem csupán közönséges gyakorlati problémák megoldására akarják használni. Vonzódnak hozzá belső ritmusa és rímei, valamint a tömör kifejezést segítő nyelvtanának széles hatóköre miatt; tudatá-

ban vannak a formának és a stílusnak, a költészet és a próza különbségének. Olyanok, mint a tiszta matematikával foglalkozók, akik a matematikát saját belső szerkezete miatt művelik. A durva sarokkövet gyönyörű szoborrá formázzák. Ha az így kapott matematika hasznosnak bizonyul, hát annál jobb.

Ez a szociológiai elemzés azonban még mindig nem ad magyarázatot arra, hogy e sarokkövek miért támogatják olyan hatékonyan a természet tudományos leírását. A dolgot csak tovább bonyolítja, hogy egy fizikai problémának több és egymástól különböző matematikai megoldása létezhet, amelyek közül egyesek nem lehetnek érvényesek a valóságra. Így annak megítélésében, hogy egy adott matematikai levezetés érvényes-e a valós világra, további megfeleltetési elveket kell használnunk. Jól szemlélteti ezt a kétértelműséget a „kókuszdió-rejtvény", amely a háború előtti Cambridge-ben vetődött fel megoldásra váró feladatként. A probléma a következő:

> Öt ember hajótörést szenved egy szigeten, ahol nincs semmi más ennivaló, mint kókuszdió (ebből viszont sok van). A szigeten van egy majom is. Megegyeznek, hogy a kókuszdiókat öt egyenlő, egész számú diót tartalmazó adagra osztják, a maradék pedig a majomé.
>
> Az I. személy az éjszaka folyamán hirtelen megéhezik, és elhatározza, hogy a neki jutó kókuszdiókat azonnal megeszi. Megállapítja, hogy öttel való osztás után a maradék 1, így egy diót odaad a majomnak, a maradék egyötödét elveszi, majd az összes megmaradt diót megint egy halomba rakja össze. Valamivel később a II. személy szintén éhesen ébred, és pontosan ugyanezt teszi – elveszi a diók egyötödét, a maradékot, amely megint 1, a majomnak adja, és a többit egy csomóban otthagyja. Ugyanezt teszi a III., IV. és V. személy is. Reggel mind felkelnek, és egyikük sem említi előző éjszakai kókuszdióügyletét. Így öt részre osztva megosztoznak a maradék diókon, és azt találják, hogy megint egy dió maradt a majomnak. Határozza meg, hogy eredetileg hány dió volt.

Ténylegesen végtelen számú megoldása létezik a rejtvénynek, de mi a feladványt kielégítő legkisebb egész számú diót szeretnénk megtalálni. Ez a szám 15 621. Nem sokkal a probléma felvetése után azonban Paul Dirac adott egy másik megoldást: –4 kókuszdió! Ez nyilvánvalóan megoldása a feladványnak. A kókuszdióraktárhoz érkező személy minden egyes alkalommal –4 diót talál, +1 diót a majomnak ad, így –5 dió marad. Az ő része a –5 egyötöde, vagyis –1 dió, ezt elveszi, így –4 dió marad a következő személynek vagy a végső osztozkodásra!

Íme egy teljesen helyes *matematikai* megoldás, amelynek (mivel „negatív kókuszdiót" megvalósítani nem tudunk) nincs a gyakorlatban érvényesülő következménye (a hagyomány szerint azonban Dirac negatív számot ered-

ményező megoldása szerepet játszott abban, hogy végül bevezette az antianyag fogalmát). A fenti esetben könnyű olyan kritériumot találni, amely Dirac megoldását valószínűtlenként kizárja, de a matematikai fizika ezoterikusabb területein nem biztos, hogy ilyen könnyű megállapítani azokat a kritériumokat, amelyek alapján egy matematikai előrejelzést valószerűtlenként elvetnénk.

A formalistákat ért megrázkódtatás

> Isten létezik, mert a matematika konzisztens, de létezik a Sátán is, mert ezt nem tudjuk bizonyítani.
>
> André Weil

Az 1920-as évekre a matematika intuicionista felfogását a matematikusok közössége néhány félrevezetett fanatikus népszerű eretnekségeként tartotta számon. A platonizmus megmaradt a tudósok által tudat alatt elfogadott semleges hozzáállásnak, bár maguk a matematikusok e nézetet ritkán védelmezték. Az akkori uralkodó meggyőződés a formalizmus dogmájában való hit volt, amely szerint a matematika önmagukban ellentmondásmentes axiómák, illetve belőlük levezethető új állítások szabályainak gyűjteménye. Az állítások tautologikusan igazak, de jelentés nélküliek lesznek abban az értelemben, hogy nem vonatkoznak semmiféle, a valóságban létező dologra. Az axiómák adott csoportjának egyedül szükséges tulajdonsága az, hogy ellentmondásmentesek legyenek; nem kell megfelelniük semminek sem a fizikai világban. Az axiómákból a rendszer szabályainak alkalmazása révén érvényes módon leszármaztatott állításokat „tételeknek" nevezzük. Ez mind igen kielégítőnek látszik, és emlékeztet arra a filozófiára, amely sok elemi matematikai rendszer, így például az euklidészi geometria kifejtése mögött is meghúzódik. Amikor az elemi geometriát tanulmányozzuk, a valós világot vagy diagramokat használhatunk iránymutatóként arra, hogy logikai lépéseink helyesek-e. Amikor a rendszer axiómái nem felelnek meg ismerős létezőknek, akkor gondosabbnak kell lennünk azzal kapcsolatban, hogy mire is alkalmazzuk logikánkat.

Először is, meg kell különböztetnünk a *matematikai* és a *matematikára vonatkozó* állításokat. Vegyünk egy egyszerű nyelvi példát! Az a mondat, hogy „Az autóm piszkos" egy mondat az adott nyelven. Ha az „autó" szót eltávolítanánk, és helyébe valódi gépkocsimat tennénk, a mondat változatlanul ugyanazt jelentené. Az a mondat azonban, hogy „Az autó négy betűből áll" teljesen más jellegű. Ez a mondat a nyelvre vonatkozik. Az „autó" szó csak helyettesítése annak a kifejezésnek, hogy „az autót jelentő szó". Ha el-

távolítjuk az „autó" szót a mondatból, és valódi gépkocsival helyettesítjük, akkor a második mondat nyilvánvalóan elveszíti jelentését. A második mondat különbözik az elsőtől, mert a nyelvre vonatkozó állítás, és emellett a nyelvben tett állítás is. Az adott nyelvre vonatkozó állításokat *metaállításoknak* nevezzük. Így tehát a metamatematikai állítások a matematikára vonatkoznak. Például az az állítás, hogy „A Püthagorász-tétel igaz" metamatematikai, míg a 2 + 2 = 4 matematikai állítás. Bár a formalisták matematikája csak önálló jelentéssel nem bíró szimbólumokkal és képletekkel foglalkozik, a metamatematika az, ami lehetővé teszi jelentéssel bíró állítások kifejtését eme jelentés nélküli jelekről.

1931-ben Hilbertet és formalista programját váratlan és megsemmisítő csapás érte. Más vezető matematikusokkal egyetemben állhatatosan tevékenykedett bizonyítások kisebb csoportjainak a kidolgozásán, melyek látszólag elkerülhetetlenül vezették őket a formalisták célja felé, amely nem más volt, mint az egész matematika befogása logikai hálójukba. Ekkor homok került a gépezetbe. Kurt Gödel, egy fiatal, ismeretlen matematikus a bécsi egyetemen rendkívül meglepő eredményt ért el: kimutatta, hogy Hilbert célja elérhetetlen. Az ellentmondás-mentességet nem lehet bebizonyítani egyetlen olyan axiomatikus rendszerre sem, amely elég kiterjedt ahhoz, hogy magában foglalja az aritmetikát. A legtöbb, amit elérhetünk, az *ellentmondásosság* bebizonyítása. Ez az a fajta különös dolog, amit csak matematikusok művelnek: bizonyítsuk be, hogy valami nem bizonyítható be! Sőt, semmiféle axiomatikus rendszer nem lehet teljes: létezniük kell a rendszer szimbólumaival kifejezett matematikai állításoknak, amelyeknek sem igaz, sem hamis voltát nem lehet bizonyítani a rendszer szabályainak alkalmazásával.

Tegyük fel, hogy van egy axiómákból és az új állítások axiómákból történő levezetésére használható szabályokból álló logikai vagy matematikai rendszerünk. Ha a rendszerben definiált szimbólumok alkalmazásával leírunk egy képletet – nevezzük F-nek –, akkor F-re négy dolog közül egy lehet igaz:

(1) F-ről bebizonyítható a rendszerben, hogy igaz.
(2) F-ről bebizonyítható a rendszerben, hogy hamis.
(3) F-nek mind igaz, mind hamis volta bebizonyítható a rendszerben.
(4) F-nek sem igaz, sem hamis volta nem bizonyítható be a rendszerben.

(1) és (2) választása nyilvánvaló lehetőség. A (3) eset fennállása kimutatná, hogy logikai rendszerünk ellentmondásos: ha (3) igaz, akkor rendszerünk értelmetlen, mert (3)-at fel lehet használni annak kimutatására, hogy *bármely*, a rendszer nyelvén megfogalmazott állítás igaz. A (4) lehetőséget, vagyis azt,

hogy a rendszer *nem teljes*, a formalisták nem vették figyelembe. Ez az az eset, amelyről Gödel kimutatta, hogy előfordulhat matematikai rendszerekben. A formalisták képtelenek lennének a matematika ellentmondás-mentességét kimutatni. Új axiómák hozzáadása a rendszerhez nem szünteti meg a problémát. Ez ugyan esetleg lehetővé teszi korábban eldönthetetlen állítások eldöntését (egyszerűen bevezetjük őket, például új axiómaként), de mindig újabb eldönthetetlen problémákat eredményez.

A matematika nem teljes voltának Gödel általi kimutatása látszólag teljesen borúlátó és negatív eredmény. Mivel teljes tudományunk matematikai rendszerekre épül, a teljesség hiányának azt a területet is meg kell fertőznie. De az alternatíva, mint az öregedés esetében is, még rosszabb. Tegyük fel, hogy építünk egy szuperszámítógépet, amely logikai műveleteket hajt végre, ha betápláljuk a rendszer axiómáit és szimbolikus nyelvét, valamint a dedukció szabályait. Bekapcsoljuk és figyeljük, amint kinyomtatja az általa levont logikai következtetéseket. Tegyük fel, hogy egy bizonyos idő után kinyomtatja, hogy „F igaz", majd kicsit később azt, hogy „F nem igaz" – ez a fenti esetek közül a (3)-as. Felfedezzük majd, hogy a szuperszámítógép az összes elképzelhető állítást kinyomtatja, ami csak a megadott szimbolikus nyelven kifejezhető. A szimbólumok és összefüggéseik összes lehetséges permutációja meg fog jelenni, ha elég hosszú ideig várunk. A baj az, hogy a rendszer ellentmondásosnak bizonyult, és az ellentmondásosság megengedi bárminek a bebizonyítását a rendszeren belül. Az ilyenfajta elkorcsosulásnak szórakoztató példáját nyújtja az a történet, amelyben McTaggart a következő kérdést intézi Bertrand Russellhez: „Ha kétszer kettő egyenlő öttel, miképpen tudja levezetni, hogy én vagyok a pápa?" Russell azonnal válaszolt: „Ha kétszer kettő egyenlő öttel, akkor négy egyenlő öttel, vonjunk le hármat, akkor 1 = 2. McTaggart és a pápa az kettő, tehát McTaggart és a pápa az egy!" Vagy egy másik eset, találja meg az olvasó a hibát a következő „bizonyításban", amely azt állítja, hogy minden állítás ellentmondásmentes: minden állításnak vagy ellentmondásmentesnek, vagy ellentmondásosnak kell lennie; tehát vagy mind azok, vagy legalább egy közülük nem az. Az utóbbi esetben a rendszer nem állhat ellentmondásban semmilyen állítással, beleértve azt az állítást is, hogy ellentmondásmentes!

Első ránézésre úgy látszik, mintha Gödel eredményei lehetővé tennék, hogy akaratlanul ellentmondásos állításokat vezessünk le matematikai rendszerünkben. De nem ez a helyzet; a (4)-es lehetőség egészen eltér a (3)-astól. Gödel tétele valójában védelmet nyújt az ellentmondásosság ellen, mert ha már egyetlen nem bizonyítható, rendszerünk nyelvén kifejezett állítást találunk, akkor ez kezeskedik érte, hogy a rendszer nem tartalmazhat a (3) szerinti

ellentmondásokat, amelyek jelenléte *minden* állítást igazzá tenne. A matematika elkerülhetetlenül nem teljes voltának Gödel általi kimutatását úgy kellene tekintenünk, mint tartalma és hatóköre végtelenségének bemutatását, s e végtelenséget egész egyszerűen nem lehet megragadni axiómákkal és az azokat definiáló logika szabályaival. A matematika egésze sokkal több, mint részeinek összege.

Szokványos esetben „vallásként" definiáljuk az elképzelések ama rendszerét, amelynek állításait nem ellenőrizhetjük sem logikailag, sem megfigyelés útján. Részben vagy egészben inkább valamiféle hittételeken nyugszik. Egy efféle definíciónak megvan az a szórakoztató következménye, hogy egyaránt vonatkozik az összes általunk ismert tudományra és gondolati rendszerre; Gödel tétele nemcsak azt mutatja ki, hogy a matematika vallás, hanem azt is, hogy a matematika az egyedüli vallás, amely ezt saját magáról be tudja bizonyítani!

Következmények a fizika tudományára nézve

> Amennyiben a matematika törvényei a valóságra vonatkoznak, nem bizonyosak; amennyiben viszont bizonyosak, nem a valóságra vonatkoznak.
>
> Albert Einstein

Hogy bebizonyíthassa figyelemreméltó tételét, Gödel kihasználta a matematika és a matematikára vonatkozó, Hilbert által bevezetett metamatematikai állítások közti különbséget. Ez lehetővé tette számára, hogy explicit módon létrehozzon egy általános célú eldönthetetlen állítást. Matematikai rendszerének összes szimbóluma és logikai művelete prímszámokkal volt kapcsolatos (vagyis olyan számokkal, mint az 5 vagy a 17, amelyek csak önmagukkal és eggyel oszthatók). Ezek után a rendszer bármely állítása azon prímszámok szorzataként fejezhető ki, amelyek az egyes alkotóelemeknek felelnek meg. E lépés indítóoka az volt, hogy bármely egész szám egy és csakis egy módon bontható fel prímszámok szorzatára (például 2 x 3 x 11 = 66 – az egyedüli mód a 66 prímszámokra bontására). S ez azt jelenti, hogy bármely adott szám egyedülálló módon megfelel egy adott logikai állításnak, amely a prímosztóinak megfelelő szimbólumokból összetett karakterláncból áll. Minden tétel egyszerűen egy számnak felel meg, amelyet a tétel Gödel-számának nevezünk. Ennek következtében minden metamatematikai állításnak van egy egyedi Gödel-száma, és így teljes a megfeleltetés az aritmetika és az aritmetikára vonatkozó állítások között. Gödel ezután az alábbi állítást tette:

Végül megtalálta a fenti állítás Gödel-számát, és ennek értékét X helyébe helyettesítette. Az eredményül kapott állítás – X helyén ezzel az értékkel – olyan tétel, amely saját bebizonyíthatatlanságát állítja. Ez a fajta érvelés megfelelő annak kimutatására, hogy az eldönthetetlenség az összes aritmetikát tartalmazó rendszernek betegsége, mert az aritmetikát használta fel a metamatematikai állításokkal való kapcsolat létrehozására (a prímszámokra bontás révén). Ez mind meglehetősen különös a konceptualista számára, hiszen saját tudatunk matematikának nevezett alkotásának sikerült az, hogy egyes részeit számunkra örökre elérhetetlenné tegye.

Annak láttán, hogy milyen módon vezette le Gödel tételét, kénytelenek vagyunk valamelyest kételkedni abban, hogy van-e valódi jelentősége a tudomány számára. Látszólag egy meglehetősen mesterkélt nyelvészeti paradoxon felállításából származik. Sokkal mélyebb benyomást keltene, ha kimutatnák, hogy egy nehéz, eddig megoldatlan matematikai probléma, amely századokon át gyötörte a matematikusokat, *valóban* megoldhatatlan, vagy esetleg azt, hogy egy fölöttébb gyakorlati jellegű matematikai probléma, mint például a „Mi a legjobb gazdasági stratégia?" logikailag megoldhatatlan. 1982-ben, valódi problémák megoldására irányuló kísérletek során felfedeztek néhány „természetes" példát az eldönthetetlen matematikai állításokra – ezek nem mesterkélt csinálmányok.

Tegyük fel, hogy egy számhalmazt „nagynak" mondunk, ha legalább annyi elemet tartalmaz, mint az elemei között előforduló legkisebb szám. Egyébként „kicsinek" fogjuk nevezni. Így például a (3, 6, 46, 78) számhalmaz nagy, de a (21, 23, 45, 100) kicsi (mert kevesebb, mint 21 elemet tartalmaz). Ezek után kimutatható, hogy ha egy *eléggé nagy* számhalmazt veszünk, és mindegyik számpárt megjelöljük, mondjuk, kék és fekete színnel, akkor e halmazon belül mindig található egy „nagy" halmaz úgy, hogy ebben a halmazban az összes számpár vagy kék, vagy fekete. Az eredmény nem annyira meglepő, ellentétben azzal, hogy a „Milyen nagynak kell lennie az *eléggé nagynak*?" kérdést nem lehet aritmetikailag megállapítani: eldönthetetlen. Az eldönthetetlen kérdések néhány más példája is ismert már; ezek természetesek abban az értelemben, hogy matematikai problémák megoldási kísérletei során merültek fel.

Gödel tételének egy másik igen érdekes vonása a véletlenszerű eloszlással való kapcsolata. Első látásra ez a kapcsolat eléggé meglepő, mégis kiderül, hogy meglehetősen mély. Nemcsak az válik világossá, hogy egy számsorozatról nem lehet logikailag eldönteni, hogy eloszlása véletlenszerű-e vagy sem, hanem a kérdést megfelelő formában feltéve eljutunk Gödel tételének egy roppant tanulságos bizonyításához, amely megvilágítja az axiomatikus rendszerek korlátait.

Tegyük fel, hogy mutatnak nekünk két, számokból álló listát, amelyeknek első néhány eleme az alábbi:

{ 3, 56, 6, 23, 78,... } és { 2, 4, 6, 8, 10,... }

Miképpen tudjuk megmérni, hogy milyen mértékben véletlenszerűek ezek a sorozatok? Először is, a kényelem kedvéért, alakítsuk át ezeket a számokat a számítógép által használt bináris alakba, így az új sorozat egyesek és nullák listájának felel meg. Tegyük fel most a kérdést, hogy mekkora a hossza a legrövidebb számítógépes programnak, amely képes előállítani ezt a sorozatot. A legrövidebb program hosszát pedig, számítógépes bitekben megadva, a sorozat *komplexitásának* nevezzük. Ha a sorozat rendszertelen, és nem tartalmaz speciális szabályt az elemek egymásból való előállítására (mint első példánkban), akkor a legrövidebb program nem lehet más, mint maga a sorozat. Ha azonban a sorozat rendezett, akkor a szükséges program sokkal rövidebb lehet a sorozatnál. Második példánkban a program egyszerűen kinyomtatja a páros számokat: { PRINT 2N, N = 1, 2, 3, ... }.

Egy sorozatot *randomnak* fogunk nevezni, ha komplexitása megegyezik hosszával. Ebben az esetben az információ maximumára van szükség megadásához. Ezért ha adott két random sorozat, akkor a hosszabbat tekintjük komplexebbnek. Ha ön nagyszámú számsorozatot választ ki, mondjuk telefonszámokat, akkor azt fogja találni, hogy komplexitásuk nagy, és csak igen ritkán találkozik olyan számsorozattal, amelynek komplexitása alacsony.

A komplexitás fenti meghatározását figyelembe véve gondoljuk el, hogy mi történik akkor, ha egy számítógépnek, mely az aritmetika összes szimbólumát és műveletét tartalmazza, az alábbi parancsot adjuk:

> Nyomtass ki egy sorozatot, amelynek komplexitásáról be lehet bizonyítani, hogy nagyobb, mint a most futó programé!

A számítógép nem tud válaszolni. Bármilyen általa előállított sorozat komplexitásának definíció szerint kisebbnek kell lennie, mint az azt létrehozó programé. Egy számítógép csak olyan számsorozatot tud előállítani, mely kevésbé komplex, mint programja. Most már képesek vagyunk a számítógép e szorult helyzetét kihasználni annak kimutatására, hogy szükségszerűen léteznek eldönthetetlen állítások. Egyszerűen válasszunk ki egy adott számsorozatot – legyen az R –, amelynek komplexitása meghaladja a számítógép rendszeréét. A következő kérdés

Random sorozat-e R?

eldönthetetlen a számítógép rendszere számára. Az „R random sorozat" és „R nem random sorozat" állítások komplexitása túl nagy ahhoz, hogy a számítógép le tudja fordítani saját nyelvére. Egyiket sem lehet sem bebizonyítani, sem pedig elvetni. Gödel tételét bebizonyítottuk.

Bizonyos állításoknak a fenti példa által bizonyított, szükségszerűen eldönthetetlen volta azért lép fel, mert a számítógép aritmetikára alapozott logikai rendszere túl kis komplexitású ahhoz, hogy a szimbólumkészletéből összerakható állítások teljes választékával meg tudjon birkózni. Ennek következményeként nincs mód annak eldöntésére, hogy egy számítógépes program, amelyet egy adott feladat elvégzésére alkalmazunk, vajon a legrövidebb program-e a feladat elvégzésére alkalmasak közül.

Egy olyan számítógépnek, mely a logikai műveletek kis tartományát képes csak elvégezni, könnyen mattot adhatunk túl nagy komplexitású kérdés feltevése útján. Ha kijelzője egyetlen izzólámpa, amely kigyullad a „nem" válasz jelzésére, és kialszik az „igen" esetében, akkor képtelen választ adni erre az egyszerű kérdésre: „Kigyújtott állapotban van-e a kijelződ?".

A fenti eredmény korlátokat emel a természeti törvények minden olyan megközelítése elé, amely egyedül az egyszerűségen alapul. A matematika formalista módszereinek tudományos megfelelője az az elképzelés, hogy a megfigyelések bármely adott sorozatát egy matematikai törvénnyel próbáljuk meg leírni. Számos különféle törvény létezhet, amelyek mind ténylegesen előállítják az adatsorozatot, de ezek közül néhány bonyolult és természetellenes lesz. A tudósok a fent leírt értelemben legkevésbé összetett törvényeket szeretik kiválasztani, az információ algoritmusba való átírásának legtömörebb változatait. Ezt a hozzáállást néha „Occam borotvájának" nevezik (William Occam középkori filozófus után, aki megfogalmazta azt az elvet, hogy „a létezők számát nem szabad szükségtelenül szaporítani").* Láthatjuk, hogy ez a megközelítés soha nem fogja megengedni annak bizonyítását, hogy egy általunk alkotott törvény a természet teljes leírása-e. Mindig lesznek a megfogalmazására használt nyelvben leírható, eldönthetetlen kérdések. Sohasem lehet bebizonyítani, hogy törvényünk a tények leggazdaságosabb leírása.

*Ezt úgy értelmezzük, hogy a dolgok a lehető legegyszerűbbek legyenek, de a szükségesnél ne legyenek egyszerűbbek. Van ennek az előírásnak egy nyugtalanító, szubjektív eleme. Hogyan várhatunk objektív igazságot egy olyan módszertől, amely az egyszerűségre vonatkozó *saját* elképzeléseinken alapul?

Mi az igazság?

> Rettenetes, ha egy férfi hirtelen ráébred arra, hogy egész életében nem mondott semmit, csak az igazat.
>
> Oscar Wilde

Láttuk, hogy a bizonyíthatóság sokkal szigorúbb követelmény, mint az igazság. Nyelvészeti paradoxonokból ténylegesen előállíthatók eldönthetetlen formális állítások. Ilyen rejtélyek tucatjai ismeretesek, és közülük néhány fontos szerepet játszott a közönséges nyelv, a matematika és a logika kapcsolatára irányuló rendszeres gondolkodás serkentésében. A leghíresebb példa valószínűleg Bertrand Russell „borbély-paradoxonja":

> A borbély borotvál mindenkit, aki nem maga borotválkozik. Ki borotválja akkor a borbélyt?

Logikai ellentmondás lép fel, függetlenül attól, hogy a borbély maga borotválkozik-e, vagy sem.* Ilyen borbély nem létezhet. Egy másik ókori példa Epimenidész paradoxonja, amelyet Szent Pál Tituszhoz intézett újtestamentumi levelében ír le:

> Azt mondta valaki közűlük, az ő saját prófétájuk: A krétaiak mindig hazugok...
>
> Tit 1,12

Az Epimenidészéhez hasonló paradoxonokat az igazság Alfred Tarski lengyel matematikus által bevezetett definíciójának alkalmazásával oldjuk fel. Ez a definíció jól kihasználja a metanyelv-elképzelést, amelyet Gödel tételének tárgyalásakor ismertettünk. Ha adva van egy nyelv, amelyben állításokat fogalmazhatunk meg, akkor annak *metanyelve* a magáról a *nyelvről* szóló állítások összessége lesz (a *nyelvben* tehető állítások helyett). Ha például franciául beszélünk az angol nyelvről, akkor a franciát az angol nyelv metanyelveként használjuk. Minden metanyelvnek szintén meglesz a saját magára vonatkozó metanyelve: valaki például beszélhetne spanyolul arról, hogy mi az angolról franciául beszélünk. Ez a hierarchia a végtelenségig folytatódhat.

*Feltesszük, hogy a borbély sem nem szakállas, sem nem asszony.

Létezik tehát a logikai nyelvek egy végtelen hierarchiája, amelyben minden nyelv a hierarchiában egy fokozattal alatta lévő nyelvre vonatkozik.

Az adott nyelven megfogalmazott logikai állításokat nem nevezhetjük igaznak vagy hamisnak anélkül, hogy a nyelvből kilépve, metanyelvet ne alkalmaznánk. Ha azt akarjuk állítani, hogy egy, a valós világról megfogalmazott mondat igaz, akkor ezt metanyelven kell állítanunk. Tarski a fenti eljárással egyértelmű módszert javasol annak meghatározására, hogy mit jelent az, amikor azt mondjuk, hogy egy állítás „igaz". Vegyük például a következő mondatot: „A FŰ ZÖLD"; Tarski azt mondja, hogy „A FŰ ZÖLD" mondat akkor igaz, ha a fű tényleg zöld.* Vagyis a fűről nagybetűkkel írt mondat akkor és csak akkor igaz, ha ténylegesen ki tudjuk mutatni – a FŰ szót valóságos gyepszőnyeggel helyettesítve, a mondat jelentésének megváltoztatása nélkül –, hogy valóban az. Így aztán beszélhetünk a nagybetűkkel írt mondatról, eldönthetjük, vajon igaz-e, összehasonlíthatjuk a bizonyítékokkal; a nagybetűkkel írt mondatnak azonban önmagában nincs jelentése, amíg a fent jelzetteket a kisbetűkkel írt metanyelven végre nem hajtottuk. Ez a körbejárkálás kifizetődő annyiban, hogy kiküszöböli a nyelvészeti paradoxonokat. Annak kimondása, hogy „Ez az állítás hamis" a nyelv és a metanyelv összekeverését okozza – állításokról beszélünk, de nem teszünk állításokat a nyelvben. Epimenidész paradoxona ugyanezt a megengedhetetlen dolgot követi el: két nyelvet kever össze. Az eltérő nyelvek ilyetén megkülönböztetése nélkül a logika ellentmondások közepette összeomlik, mert kimutatható, hogy *bármely* állítás igaz, beleértve saját tagadását is. Tegyük fel, hogy ön „bizonyítani" kívánná azt, hogy az S állítás igaz, és S bármilyen tetszőleges állítás lehet: „A malacok tudnak repülni", „Isten létezik", „Isten nem létezik", „A politikusok igazat mondanak", „Az Arsenal képes megnyerni az angol kupát"...

Egyszerűen gondolja át az alábbi állítást:

Vagy ez az egész mondat hamis, vagy S igaz.

Az egész mondat szükségszerűen vagy igaz, vagy hamis. Ha hamis, akkor látjuk, hogy S igaz, és készen is vagyunk. Másrészt ha az egész mondat igaz, akkor az „egész mondat hamis" és „S igaz" mellékmondatok közül legalább egynek igaznak kell lennie. Mivel most azt az esetet vizsgáljuk, amikor a

*A szerző ebben az esetben téved. Tarski semmit nem mond, nem is akar mondani arról, hogy a fű *tényleg* zöld-e. Vö. A. Tarski: *Az igazság szemantikus felfogása és a szemantika megalapozása.* In: Bizonyítás és igazság. 349. lap. – *A ford.*

mondatot igaznak tekintjük, az első mellékmondat nem lehet igaz. Tehát a másodiknak kell igaznak lennie, és így kimutattuk, hogy az

S igaz

állítás igaz, függetlenül attól, hogy S milyen állítás! E válságos helyzet megoldását Tarski ellenszere szolgáltatja: eredeti mondatunk nem megengedett. Egy adott nyelven tett állításokat kever össze az erre a nyelvre vonatkozó állításokkal, amelyeknek a metanyelvben a helyük.

Az igaz állítás Tarski által adott definíciója különösen azért rokonszenves, mert egyaránt jól alkalmazható absztrakt nyelven megfogalmazott matematikai vagy logikai állításokra és a közönséges nyelvre. Az egyedüli különbség a rendelkezésünkre álló módszerek milyenségében lesz, azt kimutatandó, hogy egy állítás egy alacsonyabb szintű nyelven ténylegesen igaz-e.

Kiszámíthatóság

A számítás – akár ember, akár gép végzi – fizikai tevékenység. Ha többet, gyorsabban, jobban, hatékonyabban és intelligensebben akarunk számításokat végezni, akkor többet kell megtudnunk a természetről. Bizonyos értelemben a természet évmilliárdokon keresztül folyamatosan számolja a világegyetem „következő állapotát"; csupán azt kell tennünk – és ténylegesen ez a legtöbb, amit tehetünk –, hogy „felkéredzkedünk" erre a hatalmas, állandóan folyó számításra, és megpróbáljuk kideríteni, hogy mely részei haladnak éppen arra, amerre mi is menni akarunk.

Tomaso Toffoli

Régen, az 1900-as évek elején, a Kurt Gödel kiváltotta matematikai és logikai forradalom előtti ártatlanság korában, David Hilbert egy híressé vált beszédet tartott Párizsban a Nemzetközi matematikai konferencián, amelyben felsorolta a matematika általa legnehezebbnek tartott 23 megoldatlan problémáját. A beszédében felvetett rejtélyek közül néhány a matematika egész területeinek fejlődését befolyásolta. Hilbert problémái közül sok máig megoldatlan maradt. Utolsóként felvetett problémáját a matematika formalista programjának beteljesítése felé vezető lépésként értékelték. A matematikusokat arra hívta fel, hogy szisztematikus módszert találjanak tetszőleges matematikai állítások igaz vagy hamis voltának eldöntésére. Akkoriban Hilbert feltételezte, hogy léteznie kell ilyen módszernek. A feladat csupán az volt, hogy megtalálják. Láthatjuk, hogy ha találnának egy ilyen módszert, akkor az a konstruk-

tivisták számára módot nyújtana a matematika tartalmának és hatáskörének meghatározására. Nem mindenki osztotta azonban Hilbert azon nézetét, mely szerint valóban létezik ilyen automatikus módszer. Néhány évvel később G. H. Hardy kifejtette:

> Ilyen tétel persze nincs, és ez nagy szerencse, mert ha volna, akkor matematikai szabálygyűjteményünk lenne az összes matematikai probléma megoldására, és matematikusi tevékenységünk ezzel véget is érne.

Úgy látszik azonban, hogy Hardy nem arra a meggyőződésére alapozta kételkedését, hogy egy ilyen, mindent eldöntő tétel elvileg nem vezethető le, hanem pusztán arra, hogy annak megtalálása és alkalmazása a halandó ember képességeit meghaladja. Ezért aztán Gödel felfedezése, mely szerint nem létezhet az összes állítás igazságának eldöntésére szolgáló módszer, roppant megrázkódtatást okozott a matematikusoknak. Mindazonáltal a matematika magjában létező, kikerülhetetlenül jelentkező eldönthetetlennség ellenére Hilbert eredeti álmának megmaradt egy töredéke, amely talán még megmenthető. Még akkor is, ha egy axiomatikus rendszer nyelvén tett egyes állításoknak eldönthetetlennek kell lenniük, talán létezhet egy szisztematikus eljárás az összes eldönthető kérdés megtalálására és az igaz állítások hamistól való megkülönböztetésére. Ha igen, akkor esetleg meghatározható a teljesség hiányának egymáshoz viszonyított mértéke a különböző axiómarendszerekben.

Alonzo Church és Emil Post Princetonban, valamint Alan Turing Cambridge-ben hamarosan kimutatták, hogy elvileg még ezek a szerény célok is elérhetetlenek. Church egy absztrakt módszert talált annak eldöntésére, hogy egy adott matematikai művelet kiszámítható-e minden egyes szám esetében, amelyre alkalmazzák. S így képes volt kimutatni, hogy előállíthatók olyan matematikai képletek, amelyek kiszámítása, illetve igaz vagy hamis voltának eldöntése nem lehetséges véges számú lépésben. *Bármilyen* számítógép örök időkig dolgozna hiábavalóan a feladat megoldásán. Ezekben az esetekben nincs módszer annak megállapítására, hogy bebizonyíthatók-e vagy sem. Léteznek megoldhatatlan problémák.

Alan Turing, aki egyedül dolgozott Cambridge-ben, ugyanarra a következtetésre jutott, mint Church, de olyan módszert alkalmazott, amely később, a számítógépek jövendő felfedezésében rendkívüli jelentőségre tett szert. Churchtől eltérően Turing Hilbert sejtésének megdöntését egy hipotetikus *gép* elképzelésére támaszkodva építette fel, s e gép az állítások igazságát jól meghatározott lépések sorozatával állapítaná meg. Később ezek a konstrukciók Turing-gép néven váltak ismertté. A II. világháború alatt Turing számottevő

mértékben hozzájárult a szövetségesek titkosírás-szakértőinek munkájához valódi, mechanikus eszközök úttörő jellegű kifejlesztésével, amelyek a kombinációs lehetőségek hatalmas számát próbálták ki az elfogott német üzenetek helyes megfejtésének érdekében.

A Turing-gép a számítógépek lényegét testesíti meg. Végtelen hosszúságú memóriaszalagból és egy processzorból áll, mely a gép pillanatnyi állapotát tartalmazza és mutatja. Ezt a pillanatnyi állapotot az előző állapot és a változást meghatározó utolsó utasítás kombinációja szabja meg. Egy valódi számítógépnek mindenféle különleges felszerelése van még – képernyő, grafika, szoftver, billentyűzet stb. –, de ezek nem játszanak szerepet a gép logikai képességeiben; csupán segédeszközök használatához. Egyetlen igazi számítógépnek sincs nagyobb problémamegoldó képessége, mint Turing idealizált gépének.

A Turing-gép nem tud mást tenni, mint a természetes számok egy listájából kiindulva, átalakítani azt természetes számok egy másik listájává. A gép működése mindössze kapcsolatba hozza az első lista egy számát a második lista egy számával. Ha a kívánt művelet a kettővel való szorzás, akkor a második lista összes száma az első lista számainak kétszerese lesz. Sajnos, vannak ennél végtelenül bonyolultabb műveletek, mert léteznek végtelen halmazok, amelyek végtelenül nagyobbak a természetes számok végtelen halmazánál (például az összes *irracionálisnak* nevezett szám, mint a „π" vagy a kettő négyzetgyöke, amelyek nem fejezhetők ki pontosan közönséges törtekkel, vagyis két természetes szám hányadosaként). Ezeket pedig nem lehet rendszeres módon összepárosítani a természetes számokkal. Az ilyen végtelen halmazokról azt mondjuk, hogy *megszámlálhatatlanul* végtelenek.

Turing Church nézetét fogadta el, és kimutatta, hogy léteznek matematikai problémák, amelyeket idealizált gépe nem képes véges számú logikai művelettel megoldani. E végrehajthatatlan műveleteket kiszámíthatatlan függvényeknek nevezzük, és e függvények a megszámlálhatatlanul végtelen halmazok létezéséből fakadnak. Példaként tegyük fel, hogy a $G(N)$ függvényt az $N = 1, 2, 3, \ldots$ természetes számokra alkalmazzuk, és úgy definiáljuk, hogy értéke vagy az N-edik kiszámítható függvényérték plusz egy, vagy nulla, ha az N-edik függvényérték kiszámítását végző program nem fejeződik be véges számú lépésben N betáplálása után. Látjuk, hogy a $G(N)$ függvény nem lehet kiszámítható, mert ha az N-edik függvényértéket a program valóban kiszámolná, akkor az alábbi lehetetlen eredményt kapnánk:

$$G(N) = G(N) + 1.$$

A kiszámíthatatlan függvények másik csoportja a B(*N*)-nel jelölt, úgynevezett „szorgos hangya" függvények, amelyek értéke definíciójuk szerint az *N* bitnél rövidebb tetszőleges programok által kimenetként előállított legnagyobb szám. A B(*N*) függvény értékében gyorsabban nő, mint bármiféle egyéb függvény, amely egyáltalán kiszámítható lenne. Ennélfogva kiszámíthatatlan. A gyakorlatban a legnehezebb matematikai problémákról lehet a legkönnyebben kimutatni, hogy megoldhatatlanok, mert ezek képesek legkönnyebben legyőzni a számítógépet.

Bár a számítógép nem tud minden beléje táplált feladatot kiszámítani, a legtöbb számítógéptudós hisz abban, hogy a Turing-gép képes kiszámítani bármit, ami véges időtartamon belül megoldható a megvalósítható műveletek valamilyen fizikai sorozatával, vagyis: egy probléma megoldható, ha a Turing-gép meg tudja oldani. Ezt az állítást Turing–Church-hipotézisnek nevezzük. A legutóbbi időkig azt gondolták, hogy ez a hipotézis a matematikáról mond valamit olyasmit, hogy a dolgok kiszámítására kigondolható összes lehetséges módszer alapjában véve egyenértékű, mert mindegyikük visszavezethető a Turing-gép képességeire. És mégis, nyilvánvalóan valami mélyebbet mond a fizikai világ szerkezetéről, valamint arról a tényről, hogy a matematikát oly csodálatosan alkalmasnak találjuk működésének leírására.

David Deutsch oxfordi fizikus újabban azt fejtette ki, hogy a Turing–Church-hipotézis szerint (a Turing-gép által) kiszámítható függvényeknek meghatározó tulajdonsága, hogy megvalósíthatók a természetben. Ha volna két „fekete dobozunk", az egyikben valamilyen fizikai folyamat, a másikban egy idealizált Turing-gép, akkor el lehetne érni, hogy azonos bemenetekre a két doboz azonos kimeneteket adjon. Nem tudnánk megmondani, hogy a kimenet melyik dobozban jött létre számítás útján. Ez az elképzelés nagyon szorosra fűzi a matematika és a természeti törvények kapcsolatát. Úgy alakult, hogy a természet törvényei megengedik az összeadás, kivonás, osztás és szorzás aritmetikai műveleteit pontosan végrehajtó fizikai modellek készítését. Nincs ismert oka annak, hogy a természet miért szimulálná az aritmetika szabályait, illetve annak, hogy a természeti törvényeknek miért kellene korlátozva lenniük a matematikai algoritmusok számítási képességei által, vagy azokhoz kötődniük. Szerencsénk, hogy a természet ilyen egyszerűen működik. Ha nem így volna, akkor semmiféle fizikailag megvalósítható szilícium- vagy fémszerkezet sem tudná végrehajtani az összeadás, kivonás, osztás és szorzás műveleteit. Ezek az egyszerű aritmetikai műveletek kiszámíthatatlan függvények lennének, amelyeket nem tudnánk elvégezni vagy konstruktív bizonyításokban alkalmazni. A legtöbb, amit matematikánkkal el tudnánk érni, az az volna, hogy előállíthatnánk létezésük nem konstruktív bizonyítékait, amelyek arról

vallanának, hogy ezek a függvények léteznek, fölöttébb hasonlóan ahhoz, ahogy az eldönthetetlen állítások létezését levezethetjük. Ha például számítógépeink a geometriai szerkesztésekben nem tudnának többet tenni annál, mint amit mi egyenes vonalzóval és körzővel papíron végre tudunk hajtani (vagyis egyenes vonalak és körívek rajzolását), akkor a szögeket nem tudnánk számítás útján harmadolni, habár a harmadolt szög fogalma ismerős lehetne számunkra, és valamely szögharmadoló egyenes létezését esetleg be is lehetne bizonyítani nem konstruktív módon. A természet és az aritmetikai számítások közti látszólagos kapcsolatnak a másik oldala az, hogy váratlan és másként, mint tapasztalatilag nem bizonyított, így aztán nem szabadna meglepődnünk azon (bár feltehetően meglepődnénk), ha a természetben olyan fizikai folyamatot találnánk, amely egy Turing-gép által kiszámíthatatlan függvényre vonatkozó számításokat szimulálna.

Úgy látszik, hogy a fizikai megvalósíthatóság és a kiszámíthatóság kapcsolata megköveteli, hogy a valóság kvantumképéhez hasonló elképzelések valamelyike legyen igaz. Az biztos, hogy a newtoni fizika klasszikus világa *nem rendelkezik* a Church–Turing-féle tulajdonsággal. A világ nem kvantált felfogásában az energia nem diszkrét, megszámlálható adagokban jelentkezik. A lehetséges állapotok tartományának folytonossága, amely az összes klasszikus fizikai rendszerben létezik, megakadályozza, hogy kölcsönösen egyértelmű megfeleltetés lehessen a műveletek egy megszámlálhatóan végtelen sorozata és a természeti törvények között. Deutsch felvetette, hogy a természet összes véges rendszere esetleg szimulálható „kvantumszámítógépek" segítségével. Meg tudjuk adni egy ilyen hipotetikus berendezés általános tervrajzát, és úgy látszik, képes lesz a számításokat bármiféle Turing-gépnél gyorsabban elvégezni, bár egyetlen Turing-gép által kiszámíthatatlan függvényt sem fog tudni kiszámítani. A legmeglepőbb az, hogy a kvantum-számítástechnika megköveteli egy objektív kvantumvalóság létezését. Ez csak a kvantumvalóság „sok világ"-értelmezésében lehetséges, és reményt nyújt arra, hogy valamikor talán előáll valaki a kvantumontológia problémájának kísérleti megoldásával.

Eredendően nehéz problémák

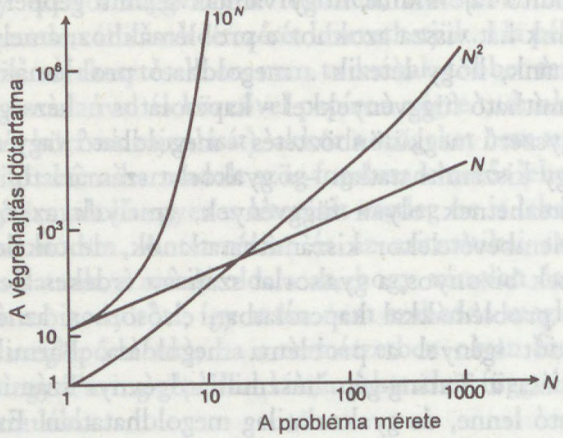
A számítások szempontjából számos fizikai rendszer irreducibilis, úgyhogy a valóságban saját evolúciójuk a leghatékonyabb eljárás jövőjük meghatározására.

Stephen Wolfram

Talán kiábrándító rájönnünk, hogy vannak számítógéppel megoldhatatlan problémák, térjünk hát vissza azokhoz a problémákhoz, amelyeket meg lehet oldani. Azt várnánk, hogy létezik a megoldható problémákkal – vagy ami ugyanaz, a kiszámítható függvényekkel – kapcsolatos nehézségek hierarchiája. Ám egy efféle egyszerű megkülönböztetés – megoldható vagy megoldhatatlan, kiszámítható vagy kiszámíthatatlan – a gyakorlat számára túl durva osztályozás. Továbbá létezhetnek olyan függvények, amelyek az összes lehetséges bemenetek figyelembevételekor kiszámíthatatlanok, de tökéletesen kiszámíthatók a bemenetek bizonyos, a gyakorlat számára érdekes alcsoportjaira.

A gyakorlati problémákkal kapcsolatban elsősorban az érdekel minket, hogy mennyi időt igényel a probléma megoldása. Bármilyen probléma, melynek megoldása a Turing-gép húszmilliárd évnyi számítását igényelné, elvileg megoldható lenne, de gyakorlatilag megoldhatatlan. Ez a pragmatikus megközelítés az alapja a modern rejtjelezésnek. Egyetlen, a gyakorlatban használt rejtjelezés sem megfejthetetlen, de elég az, ha megfejtése a rendszeres számítások milliárd éveit igényli az ellenfél leggyorsabb számítógépein is. A titkosírások szakértői kifejlesztették a kódoló eljárások „csapdafedél-függvény"-nek nevezett csoportját; e függvények nagyon egyszerűen működnek egyik irányban az üzenet kódolása során, de a másik irányban történő dekódolásuk milliárd éveket venne igénybe. Egy ilyen, az egyik irányban gyors, a másikban lassú műveletnek (innen a „csapdafedél" név) egyszerű példája az alábbi: vegyünk négy nagy prímszámot, mondjuk, mindegyik ezer számjegyű, és szorozzuk össze őket. A számítógép számára ez egyszerű feladat. Adjuk meg azonban az eredményt a számítógépnek, és kérjük meg, hogy találja meg annak négy prímszám osztóját, ekkor a számítógép olyan feladattal kerül szembe, amelynek megoldása esetleg nemzedékek százait veszi igénybe.

Valamely probléma nehézségének a gyakorlat számára alkalmas mértéke a megoldásához szükséges legrövidebb program futási idejének növekedési sebessége, amint a bemenetek számát növeljük. Tegyük fel, hogy van egy programunk, amely bemeneti adatként N különböző számot használ. Ha a kimenetet leggyorsabban kiszámoló program futási ideje N valamilyen hatványa szerint nő, ahogy N-t növeljük, például N^2-tel $(= N \times N)$ arányosan, akkor azt mondjuk, hogy a probléma polinomiális időben megoldható. Az ilyen problémákat *polinomiális* – vagy P – problémáknak nevezzük. A nehezebb problémákat, amelyek a bemenetek számának valamilyen hatványánál gyorsabban – mondjuk 2^N-nel vagy N^2-tel arányosan – növekedő gépidőt igényelnek, *nem polinomiális* – vagy NP – problémáknak mondjuk. Gyakorlatilag csak a P problémákat tartjuk kezelhetőnek. Az 5.2 ábrán néhány P és NP probléma futási idejének növekedését mutatjuk be a bemenetek számának függvényében.



5.2 ábra. A számítási idő növekedése a probléma méretének függvényében, különböző típusú problémák esetében

Sohasem mutatták ki, hogy a P és NP problémák között a számításokhoz szükséges idő hosszától eltérő, mélyebb és alapvetőbb különbség volna. Az eredendően nehéz NP problémák hasonló nehézséget mutató képviselői osztályokat alkotnak. Az egyes osztályok tagjait az a tulajdonság köti össze, hogy ha az osztály bármelyik tagját megoldják, akkor ez általános algoritmust ad az osztály többi tagjának megoldására. Tehát bármelyik NP probléma megoldása aranybánya volna.

Jól ismertek valós matematikai problémák, amelyek kiszámítási ideje N hatványánál gyorsabban nő. A leggyorsabb sakkprogram esetében 2^N-nel arányosan nő a kiszámítási idő, de létezhetnek eddig ismeretlen, N-ben polinomiális, sőt lineáris algoritmusok is. Továbbá vannak olyan matematikai problémák, amelyekről bebizonyítható, hogy elvileg nincs polinomiális megoldásuk. Az ilyen problémák gyakorlatilag megoldhatatlanok.

Tanulságos a számítások nehézségének fenti gyakorlati mércéjét az araboktól örökölt ismerős aritmetikai rendszerre alkalmazni. Az arab számjegyek és aritmetikai műveletek eme rendszere csodálatosan tömör, egyéb vesződséges jelrendszerekkel (például a római számokkal) összehasonlítva (próbálja csak meg a szorzást római számokkal!). Ha ki akarjuk számítani, akár fejben, akár számológéppel, az X-et X^2-té alakító függvényt, akkor az esetben, ha X-et a mi decimális aritmetikai rendszerünk szerint írjuk le, $N = 1 + \log_{10} X$ számjegye lesz (például $X = 10$ esetén $1 + \log_{10} 10 = 2$). Ennélfogva amikor X^2-et a szorzás műveletével számítjuk ki, a végrehajtott műveletek száma N^2-tel

arányosan nő N növekedésével. Ha azonban ehelyett ismételt összeadásokkal számítjuk ki, akkor a szükséges számítási műveletek száma X-szel, vagyis 10^N-nel válik arányossá. Az általunk alkalmazott arab jelölési rendszer hatása az, hogy egyes NP problémákat P problémákká alakít át. Ezt a lényegi egyszerűsítést észleljük, amikor szorzást végzünk az arab számrendszerben. Úgy látszik, a formalizmusnak van valamilyen, a benne elvégzett műveletekre vonatkozó, beépített logikája.

A természeti folyamatok tanulmányozása során számos probléma merül fel, amelyeket kezelhetetlenné tesz a megoldásukhoz szükséges számítógépidő rendkívüli hosszúsága. E problémáknak jellegzetes tulajdonsága, hogy nincs semmiféle egyszerűsítési módszer vagy megközelítő eljárás, amely csökkenthetné számítógépes megoldásuk bonyolultságát. Az ilyen problémák tanulmányozásának egyedüli módja az explicit szimuláció, lényegében megfigyelésük, amint történnek. Rövidebb utak hiányában nem tehetünk mást, mint hogy a rendszer számítógépbe programozott modelljének fejlődését figyeljük meg. A program futási ideje semmivel sem lesz rövidebb, mint a valóságos esemény lejátszódása, és további információ hiányában tanulságosabbnak sem lesz mondható.

Sajnos, vannak más, alapvető korlátok a matematikai algoritmusok és egyenletek felhasználásában, ha a természet működését akarjuk leírni. Mindeddig eszmefuttatásaink a számítási eljárások logikai korlátaira és a matematikai képletek ideális számítógéppel történő megoldásának időigényére irányultak. De teljes joggal feltehetnénk azt a kérdést is, hogy „Milyen az ideális számítógép?" A számítógépeket olyan anyagokból készítjük, amelyek maguk is a természeti törvények hatása alatt állnak. Milyen korlátokat szabnak, ha egyáltalán szabnak, a természeti törvények a számítógépek hatókörére és sebességére? Milyen az elképzelhető legjobb számítógép?

Olyan probléma ez, melyre a természet lassan, a „kísérletek" millió évein át egyre jobb és jobb megoldásokat talált. Az emberek és állatok agya bonyolult számítógép, de mert a természetes kiválasztódás folyamata élesítette képességeiket, számos olyan elemet tartalmaz, amelyekkel nem törődnénk, ha szuperszámítógépet akarnánk építeni a laboratóriumban. Az emberi agy mindenféle sajátos programot tartalmaz, amelyek a programot megtestesítő hús-vér „hardverrel" kapcsolatosak; ezen fut az „intelligens élet"-nek nevezett program. E sajátos programok a végtagok és izmok mozgását szabályozzák, és más, az agy számítási képességével csak közvetetten összefüggő folyamatokat irányítanak. Mégis agyunk és testünk evolúciójának vannak más fizikai korlátai is, amelyek olyannyira alapvetőek, hogy bármiféle ember alkotta számítógép korlátainak meghatározásában is szerepet játszanak.

A legtöbb madár és gerinces állat esetében az agy mérete együtt nő L testméretükkel, nagyjából az alábbi összefüggés szerint:

$$\text{Agyméret} \propto L^{9/5}.$$

E melegvérű lények táplálék fogyasztása révén élnek meg, ami testüknek energiaforrást nyújt. Az állatok azonban folyamatosan hőt veszítenek, ha környezetük hőmérséklete kisebb testhőmérsékletüknél. Az a sebesség, amellyel a táplálékból hőt képesek fejleszteni, térfogatukkal, vagyis L^3-nal arányos, míg hőveszteségük a hidegebb környezetben testük felszínével, vagyis L^2-tel. Így látjuk, hogy a kis állatok bajban vannak hidegben: nem tudnak elég gyorsan táplálékot felvenni ahhoz, hogy állandó testhőmérsékletet tartsanak fenn. Ezért találunk a sarkvidéken jegesmedvéket, és nem egereket, és ezért nő a madarak átlagos testmérete, amint az Egyenlítőtől a sarkok felé haladunk. Nagy agyakhoz nagy állatok szükségesek, és a nagy állatoknak (márpedig az ember a legnagyobb kétlábon járó állat) ahhoz, hogy egyensúlyt tudjanak tartani a szívverésük által létrehozott belső hőtermelésük és a hővesztés között, az szükséges, hogy p pulzusszámuk fordítottan arányos legyen L méretükkel. Azért, mert

$$\text{Hőtermelés} \propto \text{pulzusszám x térfogat} \propto p \times L^3$$

és

$$\text{Hőveszteség} \propto \text{felszín} \propto L^2.$$

A nagyobb állatoknak így erősebb, lassabban verő szíve van, és ahogyan gyermekből felnőtté növekedünk, pulzusszámunk ennek megfelelően csökken. Mi köze van mindennek a számítógépekhez?

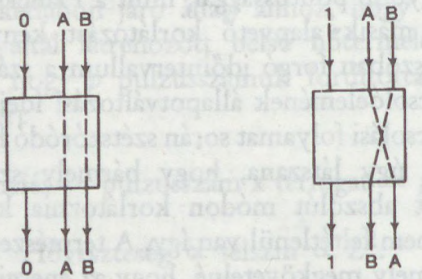
A számítógép az információt bizonyos sebességgel dolgozza fel, ezt akár „pulzusszámának" is nevezhetnénk. Az elektromos áramkörökben keletkező hőt a számítógépnek le kell adnia, különben hőmérséklete állandóan növekszik, és előbb-utóbb megolvadnak áramkörei. Minél nagyobb a számítógép, és minél gyorsabban dolgozza fel az információt, annál nehezebb eltávolítani a keletkezett hőt. Megpróbálhatnánk olyan számítógépet építeni, amely a vártnál sokkal nagyobb mértékben növeli felületét, amint térfogata megnövekszik. Sok állat tesz így: a szivacsok és a lepényhal ennek közönséges példái. A szivacsok tekervényes testének sokkal nagyobb szabad felülete van, mint egy azonos átmérőjű gömbnek. Ha azonban megpróbálnánk egy számítógép hűtési problémáit így megoldani, akkor csak egy bizonyos szintig juthatnánk el, amelyen túl az összes felesleges kanyarulat bejárásához szükséges áramköri

összeköttetés hossza elfogadhatatlanul naggyá válna. Ez azt eredményezné, hogy bármilyen, még a fény sebességével haladó jelnek is túl hosszú időre volna szüksége ahhoz, hogy a számítógép egyik részéből a másikba eljusson, és ennek következményeként lecsökkenne a számítások elvégzésének sebessége. A fenti, egyszerű meggondolások azt jelzik, hogy az agy méretének és teljesítőképességének lehetnek határai, függetlenül attól, hogy a szerves kémián alapul-e, mint a miénk, vagy a mikroelektronikai ipar szilícium-vegyületein.

A számítógépek teljesítőképességének a természet által megszabott, végső és pontos határait még nem állapították meg. Előre láthatjuk, hogy egyes ismert természeti törvényeknek szerepet kell játszaniuk e korlát meghatározásában, például annak a korlátozásnak, hogy az információ továbbítása nem történhet a fényénél nagyobb sebességgel. De mi a helyzet a kvantumelméleti és termodinamikai korlátokkal? Hosszú ideig azt hitték, hogy Heisenberg határozatlansági elvének egyik változata (amely megtiltja az időtartam és az energia egyidejű mérését nagyobb pontossággal, mint a Planck-állandó osztva 4π-vel) szükségszerűen egy másik alapvető korlátozást kényszerít a leggyorsabb számítógépre. Ha a szóban forgó időintervallum a számítógép egyik logikai kapujának vagy kapcsolóelemének állapotváltozási ideje volna, és az energia-bizonytalanság a kapcsolási folyamat során szétszóródó hő minimumával volna kapcsolatban, akkor úgy látszana, hogy bármely számítógép információfeldolgozó sebességét abszolút módon korlátoznia kell a határozatlansági elvnek. Ez azonban nem feltétlenül van így. A természet kvantumelméletének nincs olyan eleme, amely megkövetelné, hogy az energia–idő határozatlansági elvben az energia határozatlanságának kapcsolatban kell lennie a fizikai folyamatban szétszóródó hőmennyiséggel. A számítási folyamatot végre lehet hajtani lépésenként, egy kvantumnál kevesebb energia szétszóródásával. Egy T ideig tartó eseményt megmérhetünk E energia felhasználásával, amely energia kisebb, mint a Planck-állandó osztva 4π-vel, mindaddig, amíg az időt valamilyen külső, nem a fizikai folyamat által belsőleg meghatározott mércével mérjük. Ily módon Heisenberg határozatlansági elve általában semmiféle alapvető korlátot nem szab a számítási folyamatnak. A hulladékhő korábban említett problémája a legalapvetőbb szinten arra a kérdésre szűkül, hogy a számítógép logikai műveletei szükségszerűen irreverzibilisek-e. Ha igen, akkor a termodinamika II. főtétele szerint hőt és entrópiát kell termelniük. A közönséges aritmetika valóban irreverzibilisnek látszik. Ha a $2 + 2 = 4$ összeget tekintjük, ennek nincs egyedi inverze. A végösszeget egyaránt előállítja $3 + 1$ vagy $0 + 4$, így a 4-es szám megadásakor az információ irreverzibilis elvesztése, vagyis entrópia termelése történik, amikor azt két szám összeadása

révén megkapjuk. Ez a fajta irreverzibilitás hasonló ahhoz, amit a 3. fejezetben magyaráztunk meg, a II. főtétel és a természet időszimmetrikus törvényei között fennálló kapcsolat tárgyalásakor. Mindig több mód van a 4 összeg két számra bontására, mint az összeadásból származó egyedüli összeg. Az aszimmetria annak ellenére fennáll, hogy az aritmetika műveletei reverzibilisek. De talán vannak más, *valóban* reverzibilis módok a számítások elvégzésére?

Néhány évvel ezelőtt Edward Fredkin kimutatta, hogy van egy logikai kapu, melynek működése *valóban* reverzibilis, és ennélfogva – elvileg – entrópia és hő termelése nélkül képes feldolgozni az információt. A Fredkin-kaput sematikusan az 5.3 ábra mutatja be. Ennek az eszköznek a gyakorlati korlátja az, hogy az információt valamilyen eljárással a gépbe kell vinni s onnan kinyerni. A számítógépet a külvilággal összekötő folyamatokat *valóban* korlátozzák a termodinamika törvényei, s ezért irreverzibilisek.



5.3 ábra. A Fredkin-kapu lehetővé teszi a reverzibilis számítást. A kapunak három bemenete és három kimenete van. A baloldali bemenetet a kapu minden esetben változtatás nélkül átviszi a kimenetre, de bináris értéke (0 vagy 1) a másik két kimenet értékét változatlanul hagyja, illetve felcseréli. Ez a számítási művelet nem okoz információveszteséget, és saját maga inverze; ennélfogva a művelet reverzibilis

Beszéltünk a modern számítógép-tudomány néhány elképzeléséről, mert azt szerettük volna bemutatni, hogy felfokozott érdeklődés mutatkozik az iránt, hogy miképpen szabják meg a számítógépek teljesítőképességét a természeti törvények. Ez idáig a *kvantum-számítógépek* teljesítőképességének alapvető korlátait még nem vizsgálták részletesen. Kétségtelen, hogy ezek a gépek el tudnak majd végezni olyan feladatokat, amelyeket semmiféle mostani számítógép nem tud elvégezni. A számítások e végső korlátait illető meggondolások mintha afelé látszanának haladni, hogy a természet új állandóit határozzák meg. Úgy látszik, mintha létezne a legnehezebb probléma: az, amelyet a világegyetem kezdetétől a jelenig terjedő idő alatt lehet csak kiszámolni. Ha a

világegyetem véges méretű, és csak a kozmikus idő véges időtartamán belül fog fennállni, akkor létezhetnek olyan problémák, amelyek elvileg (egy platóni világban) kiszámíthatók ugyan, de a mi világegyetemünkben nem.

A tudatlanság dilemmája

> A középkori szellem legnagyobb hozzájárulása a tudományok kialakulásához az a megkérdőjelezhetetlen hit [volt], hogy minden egyes egyedi esemény tökéletesen meghatározott módon kapcsolatba hozható az azt megelőzőkkel.
>
> A. N. Whitehead

A matematika rejtett finomságai és a számítási folyamatok végső korlátai misztikus kapcsolatot tárnak fel a matematikai logika belső világa és a világegyetemet alkotó fizikai folyamatok között. Azt találtuk, hogy a matematika mint természetleírás hatóköre mind elvileg, mind pedig gyakorlatilag korlátozott. Mindezen megfontolásainkban a nem kvantált világot egy létfontosságú vonatkozásban idealizáltnak tekintettük: feltételeztük, hogy ami elvileg tudható, azt a gyakorlatban is teljes pontossággal tudhatjuk. Ez nyilvánvalóan helytelen feltevés, de vajon ártalmatlan egyszerűsítés-e csupán, vagy egy veszélyes ék keskeny éle, amely össze fogja rombolni a nem kvantált világra vonatkozó megközelítésünket még mindig befolyásoló mechanikus világképet? Milyen következményei vannak a természeti törvények nem pontos ismeretének? Figyelmünket most erre a problémára irányítjuk.

Maxwell a determinizmusról

> A tündérmesékben a világmindenség megőrül, a hősnek azonban helyén van az esze. A modern regényekben viszont a hős már azelőtt eszét vesztette, mielőtt a könyv elkezdődött volna, és rettentően szenved a világmindenség nyers határozottságától és kegyetlen józanságától.
>
> G. K. Chesterton

Mikor Maxwell 1871-ben visszatért a cambridge-i Trinity College-be állást vállalni, felújította tagságát a cambridge-i professzorok egyik előkelő csoportjában. A tagok rendszeres megbeszéléseket tartottak kutatási területük filozófiai és vallásos jelentőségének megvitatására. Ez az örökös, tizenkét tagú csoport „Apostolok"-nak nevezte magát (de nem tévesztendő össze az azonos nevű

későbbi, hírhedt cambridge-i csoporttal!). E csoportosulás az eljövendő években olyan csillagokat toboroz majd, mint Bertrand Russell és G. E. Moore. Maxwell legközelebbi barátai közül sokan szerepeltek tagjai között. Jóllehet Maxwell a skót egyház kebelében nőtt fel, 1853-ban megrázó vallási áttérésen ment át, és a ma evangélikusként ismert vallás híve lett. Hitt abban, hogy a tudomány birodalma az egyetemes, közös tapasztalat, míg a vallás a roppant mód különböző személyes világnak a része; e világ „én vagyok" kijelentését „nem használhatja ugyanolyan értelemben két ember közülünk, ezért sohasem válhat tudománnyá" – érvelt. Az Apostolok kötetlen vitáit a tudományról és vallásról gyakorlóterepként használta a nézetek e két eltérő csoportjának összefüggésére irányuló gondolkodása kifejlesztésében. Az Apostolok más tagjaihoz hasonlóan kételkedett a korabeli konzervatív vallási gondolkodók darwinizmussal szembeni, túlságosan magabiztos ellenérveiben, és ugyancsak ellenszenvesnek találta William Paleynek és deista követőinek logikáját, akik evolúcióellenes nézeteiket arra a hitre alapozták, hogy minden, ami csak a természetben előtalálható, az isteni teremtő jóindulatát bizonyítja.

Mikor az Apostolok 1873. február 11-ének estéjén találkoztak, arra kérték Maxwellt, hogy fejtse ki a szabad akarattal kapcsolatos nézeteit. Rövid beszámolójának az alábbi felvetést kellett bevezetnie: „A tudományos haladás a szabad akarat létezésébe vagy inkább a determinizmusba vetett hit előnyben részesítéséhez vezet-e?". Mielőtt meghallgatjuk mondanivalóját, érdemes kitérőt tenni, és megvizsgálni, hogy mi ösztökélhette az Apostolokat ilyen ezoterikus vitára.

Darwin forradalmi felvetése, mely szerint emberi pszichológiánk és tudatunk sajátságai véletlen események eredményei, amelyeket igen hosszú idő alatt, túlélési képességük alapján részesített előnyben a szelekció, látszólag ellentétbe került a determinizmussal. Jó néhány híres XIX. századi fizikus érvelt úgy, hogy Darwin elmélete nem kínál több magyarázatot a környezetükhöz alkalmazkodott élőlények létezésére, mint az a régi nézet, mely szerint e lényeket így teremtették, és azóta is ilyenek maradtak. Hittek abban, hogy Newton mechanikai világának merev determinizmusa biztosítja, hogy a természet jelenlegi állapota a világegyetem kezdetekor fennálló, meghatározott állapot egyedi és közvetlen következménye. Az értelmes emberi lények és az őket körülvevő harmonikus környezet létezése ezek után nem lesz inkább (vagy kevésbé) misztikus, mint e sajátos kezdeti állapot létezése, függetlenül attól, hogy történt-e valaha is bármiféle evolúció. A fizikusoknak a mechanikus newtoni világmodellbe vetett hitével szembekerülve azonban számos teológus – bár Darwin nézeteit visszataszítónak érezte, mégis – kellemetlen kényszerhelyzetben találta magát. A newtoni fizika mesébe illő sikereit szerették bizonyítékként felhozni arra, hogy a világot óraként alkották meg,

és így levezetni egy isteni órásmester létezését. Ugyanakkor azonban a hagyományos csodák bizonyítékaira is hivatkozni akartak – vagyis a newtoni világ óraműszerű előreláthatóságától való *eltérésekre* – vallásos hitük alátámasztása érdekében.

A darwini evolúció kapcsán Maxwell úgy érvelt, hogy a „molekuláknak" (valójában azokra a részecskékre gondolt, amelyeket ma atomoknak nevezünk), azaz a természet egymással azonos építőköveinek létezése azt mutatja, hogy a természetes szelekció nem korlátlan. A molekuláknak meghatározott tulajdonságaik vannak, amelyek nem változnak. Az a tény, hogy mind *azonosak* egymással, számára az isteni tervezés jele volt. A British Associationhöz intézett híres beszédében 1873-ban így érvelt:

> Nem lehet semmiféle evolúciós elméletet gyártani a molekulák hasonlóságának magyarázatára, mert az evolúció szükségképpen folyamatos változást von maga után, és a molekulák képtelenek növekedésre vagy elsorvadásra, keletkezésre vagy elpusztulásra.
>
> Mióta a természet elkezdődött, egyetlen folyamata sem hozott létre a molekulák tulajdonságaiban szemernyi változást sem... Ugyanolyanok maradtak, mint amilyennek teremtették őket – tökéletesek számukban, méretükben, súlyukban; a beléjük vésett, kitörölhetetlen tulajdonságokból megtanulhatjuk, hogy a méréseinkben a pontosságra, cselekedeteinkben az igazságosságra való törekvésünk, amelyet legnemesebb emberi tulajdonságunkként tartunk számon, azért van meg bennünk, mert ez lényegi alkotóeleme az Ő képének, aki a kezdetekkor nemcsak a mennyet és a földet teremtette, hanem az azokat felépítő anyagot is.

Maxwell nem zárta ki azt a lehetőséget, hogy egykoron esetleg létezhettek az atomok más változatai, a maiaknál kevésbé alkalmasak a szilárd testek felépítésére, de a nem egységes tulajdonságú, működésképtelen, kóbor atomok fosszilis maradványainak hiányában félresöpörte ezt az elgondolást.

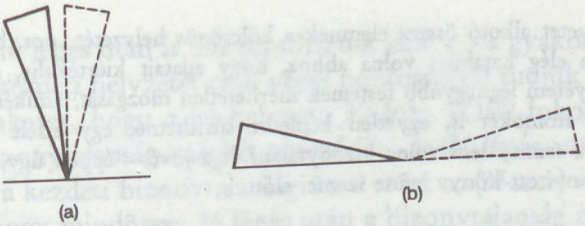
A szabad akaratról és determinizmusról az Apostolok számára tartott magánelőadásában Maxwellnek nem sok mondanivalója akadt a szabad akarat sokat vitatott tárgyáról. Ehelyett a newtoni fizika determinisztikus jellegéről alkotott népszerű tévedésekre összpontosított, és alapvető megfigyelést tett a bennünk oly könnyen felmerülő látszólagos ellentétről a szabad akarat és a determinisztikus tudomány között. Akik a determinizmus felé hajlanak – érvelt Maxwell –, azok figyelmüket mindig az óraműszerű világegyetem képét megerősítő problémákra irányítják. Példáik kivétel nélkül felmutatnak egy sajátos tulajdonságot: *a kezdeti feltételekben bekövetkező csekély változás, amely valamilyen mozgást idéz elő, a végállapotban is csak csekély változást okoz.* Az a hamis nézet vezet „a determinizmust előnyben részesítő előítélethez", hogy

minden mozgás rendelkezik a fenti elegáns tulajdonsággal. Maxwell ehelyett az alábbiakat vetette fel:

> E kérdések némelyikére fényt vethet a stabilitás és instabilitás problémájának átgondolása. Amikor a dolgok állása olyan, hogy a jelen állapot végtelenül kis megváltozása a jövőbeli pillanatban előálló helyzetet csak végtelenül kis mértékben változtatja meg, akkor a rendszer állapotáról, akár mozgásban van, akár nyugalomban, azt mondjuk, hogy stabil; amikor azonban a jelen állapotban bekövetkező végtelenül kis változás véges időn belül a rendszer állapotának véges mértékű változását okozhatja, akkor a rendszerről azt mondjuk, hogy instabil.
>
> Nyilvánvaló, hogy az instabil állapot létezése a jövőbeli események előrejelzését lehetetlenné teszi, ha a jelenlegi állapotra vonatkozó tudásunk csak közelítő jellegű, nem pontos... Az csupán metafizikai doktrína, hogy ugyanazon okokból ugyanaz következik, de igazságát senki sem tagadhatja. Ám nem sok haszna van világunkban, ahol ugyanazok az okok sohasem lépnek fel újra, és semmi sem történhet meg kétszer... A valamelyest hasonló vonásokat mutató fizikai axióma ez: „Hasonló okok hasonló következményekkel járnak." Itt azonban az azonosságtól a hasonlósághoz jutottunk, az abszolút pontosságtól a többé-kevésbé durva közelítéshez. Amint mondottam, vannak a jelenségeknek bizonyos osztályai, amelyekben az adatok kis hibája az eredményben is csak kis hibát okoz... Az események lefolyása ez esetben stabil.
>
> Létezik a jelenségek másik, bonyolultabb osztálya, amelyben az instabilitás esetei előfordulhatnak...

Maxwell felismerte, hogy létezik számos fizikai helyzet, melyben az adott pillanatban meglévő tudásunkban jelentkező bármiféle bizonytalanság, akármilyen kicsi is, növekvő bizonytalansághoz vezet a jövőben. Még ha a természet tökéletes törvényeinek birtokában lennénk is, ilyen körülmények között nem biztos, hogy fel tudnánk használni őket a jövő előrelátására.

Tegyük fel, hogy veszünk egy tálat és golyókat. Engedjünk legurulni egy golyót a tál felszínének egy pontjáról, és az előbb-utóbb nyugalomba jut a tál legmélyebb pontján. Ha a golyót kissé eltérő kiindulópontról engedjük el, ez nem okoz semmiféle változást az eredményben: a golyó ekkor is a tál legalján fejezi be mozgását. Nyilvánvaló, hogy a golyó kezdeti helyzetére vonatkozó tudásunk kis bizonytalansága nem akadályozza meg jövőbeli viselkedésének meghatározását. A bizonytalanságot háttérbe szorítja a stabil végállapot felé tartó mozgás elsöprő tendenciája. Nézzük most az 5.4 ábrán feltüntetett bizonytalan helyzetet. Az *a* állapotban a két kúp helyzete csak végtelenül kis mértékben különbözik, de a kicsiny különbség *b* eredménye igen nagynak bizonyul.



5.4 ábra. Két egyforma és instabil egyensúlyi állapotából infinitezimálisan kismértékben kimozdított, hegyére állított kúp instabil rendszerének állapotában fennálló kicsiny kiinduló különbség (a), igen nagy különbséget eredményez a végállapotban *(b)*

Ha egy fizikai rendszer kiindulási állapotát képtelenek vagyunk megfelelő pontossággal meghatározni, akkor Newton mozgástörvényei (még ha tökéletes leírásai is a világ működésének) teljesen használhatatlanok lesznek a rendszer jövőbeli viselkedésének meghatározására. Így tehát a newtoni óraművilág a gyakorlatban nem determinisztikus, még ha elvileg az is, mert előfordulhat, hogy nem vagyunk képesek a „most" világának állapotát megfelelő pontossággal rögzíteni ahhoz, hogy Newton egyenleteinek előrejelző képességét kihasználjuk. Az egyenleteket nem szabad ezért okolnunk. Olyan helyzetben találják magukat, mint egy számítógép, amelyet azért szidnak, mert 20 ezer gázszámlát küldött egy szegény öregasszonynak. Az egyenletekbe táplált információ pontossága az, ami megszabja az eredmény pontosságát – „Szemét be, szemét ki!"

Az előrejelzés eme csődje fontos gyakorlati helyzetekben is előfordul. Ez az alapvető oka annak, hogy miért lehetetlen az időjáráshoz hasonlóan bonyolult rendszerek jövőbeli viselkedésének előrejelzése. A meteorológusok tehetetlensége az időjárás *jelenlegi* állapotának megfelelő pontosságú meghatározására az oka annak, hogy előrejelzésük oly sokszor téves.

A determinizmus e gyakorlati jellegű aláásásának semmi köze sincs a kvantumelmélet által okozott elvi jellegű aláásásához, bár a kvantumbizonytalanságból az fakad, hogy bármely fizikai rendszer kezdeti állapotára vonatkozó tudásunkban mindig kell lennie valamilyen bizonytalanságnak. Az abszolút pontosság hiánya a dolgok jelenlegi állapotát kitudakolni akaró méréseinkben megtagadja tőlünk az olyanfajta determinizmust, amelyre Pierre Laplace gondolt, amikor – oly korban írva, mely az okok szükségszerűségének felismerésével utat nyitott az okok elégségességébe vetett hitnek – a következőket állította:

> A világegyetem jelenlegi állapotát úgy tekinthetjük, mint múltjának eredményét és jövőjének okát. Valamely értelem, mely egy tetszőlegesen adott időpontban ismerné a természetet mozgató összes erőnek és a

> természetet alkotó összes elemnek a kölcsönös helyzetét, nos, ha ez az értelem elég hatalmas volna ahhoz, hogy adatait kiértékelje, akkor a világegyetem legnagyobb testeinek mérhetetlen mozgását, amiként a legkisebb atomokét is, egyetlen képletbe sűríthetné; egy efféle értelem számára semmi sem volna bizonytalan, és a jövő – éppen úgy, mint a múlt – nyitott könyv lenne szemei előtt.

Megemlíthetnénk, hogy bár a determinizmus kifejtett állítását mindig Laplace érdemének tudják be, megelőzte őt Leibniz, aki így ír:*

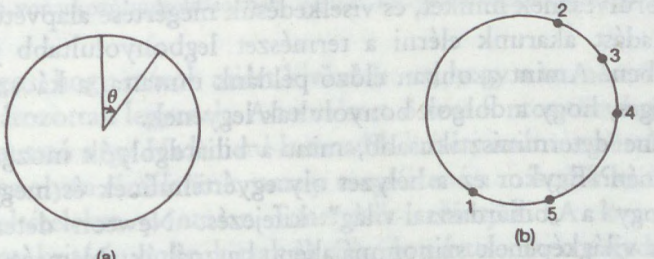
> Nos, minden oknak megvan a maga sajátos okozata, melyet eredményez... Ha például két golyó találkozik egy szabad térben, és ismerjük ütközés előtti méretüket, útjukat és irányukat, akkor képesek vagyunk megjósolni, hogyan verődnek vissza, s milyen utat követnek az ütközés után... Amiből látható, hogy széles e világon minden matematikailag – vagyis kivételek nélkül – megy végbe, úgyhogy ha valaki kellőképpen beleláthatna a dolgok belsejébe, s ráadásul emlékezete és értelme képessé tenné arra, hogy az összes körülményt mérlegelje és számításba vegye, akkor próféta lenne, és a jelenben úgy látná a jövőt, mintha tükörbe pillantana.

Esetleg azt gondolhatnánk, hogy a determinizmus elleni fenti kihívásra a megfigyelések pontosságának növelése a válasz. Minél pontosabb a jelen világra vonatkozó ismeretünk, annál megbízhatóbbak lesznek előrejelzéseink. Sajnos, a megnövelt pontosság sem segít igazán, mert a jövő bizonytalansága oly gyorsan nő, hogy könnyedén meghaladja jelentéktelen próbálkozásainkat a jelen állapot pontosabb megadására. Íme egy egyszerű, de a való helyzettel számoló példa a délibáb kergetésére.

A kör kerületére teszünk egy jelet, melynek helyzetét a függőlegessel bezárt szöge alapján fogjuk meghatározni (5.5 ábra). Most előírunk egy mozgástörvényt, mely szerint a jel a korábbi szögének kétszeresével egyenlő szögű új helyzetbe mozdul el. Az új helyzet tehát (szögfokokban kifejezve) mindig a régi szög kétszeresének 360 fokkal történő osztása utáni maradék lesz. Ez a szabály matematikailag szabatos, és a jel mozgása pontosan meghatározott lesz

*Ez a leírás megvilágítja a newtoni mechanika hagyományosan determinisztikus felfogásának egy másik hibáját. Ha ütközések történnek, akkor a részecskék sebességében bekövetkező változások előrejelzéséhez és így dimamikájuk jövőbeli viselkedésének egyértelmű meghatározásához ismernünk kell az ütközés rugalmasságának mértékét. Ez pedig olyan fizikai információt igényel, amely a mechanika hatáskörén kívül esik. A sok mozgó tárgy dinamikájának modern számítógépes vizsgálataiban a kölcsönhatásokat mesterséges úton „gyengítik" azért, hogy a tényleges ütközések létrejöttét megakadályozzák.

tetszőleges számú lépés után is. De mi történik akkor – a gyakorlatban mindig így lesz –, ha a kezdeti helyzetet csak véges pontossággal tudjuk meghatározni: mondjuk, tudjuk azt, hogy a jel helyzete 30 fok, 1/100 fokos hibával. Egy lépés után a bizonytalanság megkétszereződik, és N lépés után már lavinaszerűen megnő a kezdeti bizonytalanság 2 x 2 x 2 x ... (N-szer) = 2^N-szeresére. Ez azt jelenti, hogy mindössze 16 lépés után a bizonytalanság már 360 foknál nagyobb lesz, és semmiféle következtetést nem vonhatunk le a jel következő helyzetére nézve a kör kerületén.



5.5 ábra. A szövegben ismertetett kör-algoritmus. Az algoritmus a pontot a kör kerületén új helyzetbe viszi át, amely a pont előző szögértékének kétszeresénél helyezkedik el. A szöget minden esetben a 360 fokkal történő osztás maradéka adja meg. Így tehát, ha az első helyzet szöge 190 fok, akkor a következőé 380–360 = 20 fok, a harmadiké 40 fok, és így tovább. Az ábrán az első öt helyzetet mutatjuk be

A legtöbb, amit tehetünk, annak megjóslása, hogy a jelet egyforma valószínűséggel találjuk a kör kerületének bármely pontján, függetlenül attól, hogy honnan indult el. A kezdeti helyzet pontosabb megadásával elodázhatjuk azt az időpontot, amikor determinisztikus törvényünk használhatatlanná válik. A bizonytalanság növekedése azonban olyan gyors, hogy még abban az esetben is, ha a helyzetet egy atom méretének pontosságával adjuk meg, csupán 38 lépés szükséges a bizonytalanság 360 fokra való emelkedéséhez. A pontosság növelése gyakorlatilag jelentéktelen mértékben odázza csak el a gyászos napot. A bizonytalanság mindig utolér minket. Alapvető elvi probléma merült fel: a kezdeti feltételektől való érzékeny függőség. Ha ön e finom részletnek nem volna tudatában, akkor vakon folytatná a jel helyzetének előrejelzését, teljesen megbízva a kiszámítására használt pontos törvényben. De mindössze néhány lépés után pontos előrejelzése már semmit sem érne.

Káosz

Lehetelen egyedi matematikai trajektóriák tulajdonságait tanulmányozni. A fizikusok csak különböző kezdeti feltételeknek megfelelő trajektóriák kötegeit ismerik.

Leon Brillouin

Azokat a fizikai jelenségeket, amelyek a kis változásokra ilyen érzékenyen válaszolnak, *kaotikusnak* nevezzük. Érdekességük semmiképpen sem pusztán elméleti. Körülvesznek minket, és viselkedésük megértése alapvető fontosságú, ha előrehaladást akarunk elérni a természet legbonyolultabb jelenségeinek értelmezésében. Amint azonban előző példánk mutatta, a káosz fellépéséhez nem szükséges, hogy a dolgok bonyolultak legyenek.

Mi lehetne determinisztikusabb, mint a biliárdgolyók mozgása a biliárdasztal felszínén? Egykor ez a helyzet oly egyértelműnek és megjósolhatónak látszott, hogy a „biliárdasztal-világ" kifejezést Newton determinisztikus, mechanikus világképének szinonimájaként használták. Nemrég láttuk, hogy Leibniz ilyen ütközésekkel szemléltette a determinizmust. A biliárdhoz és rexhez hasonló játékok azonban a Maxwell által megvilágított különös érzékenységet és instabilitást mutatják. Tapasztalatból tudjuk, hogy ezekben a játékokban a lökés legapróbb bizonytalansága katasztrofális hibákat okoz. Tegyük fel, hogy elhanyagoljuk a légellenállást, valamint a golyó és az asztal közti súrlódást (a gyakorlatban ezek okozzák, hogy a golyó a lökés után bizonyos idővel megáll). Ha a kiindulási helyzetet olyan pontossággal ismernénk, amelyet Heisenberg kvantumbizonytalansági elve megenged, akkor a golyó helyzetében meglévő bizonytalanságunkat az atommag méretének egybilliomod részénél kisebbre csökkenthetnénk (ez persze a gyakorlatban teljesen lehetetlen, de tekintsünk el most a gyakorlatiasságtól). Ennek ellenére, miután a golyót meglöktük, ezt a bizonytalanságot a többi golyóval és az asztal peremével való ütközések olyannyira felerősítik, hogy mindössze tizenöt ütközés után kezdeti helyzetének tovább már nem csökkenthető, végtelenül kis bizonytalansága az egész asztal méreteire fog növekedni. Egyáltalán semmilyen előrejelzést sem tehetünk Newton mozgástörvényeinek alkalmazásával a golyó további mozgására az asztalon.

Különös, hogy a fenti egyszerű elképzelések jelentőségét milyen sokára ismerték csak fel. 1929-ben, hosszú idővel a Maxwellhez és Poincaréhoz hasonló fizikusok ösztönös megérzései után, Jacques Hadamard befolyásos francia matematikusnak számos követője akadt, amikor megfogalmazta három kritériumát, amelyek meggyőződése szerint hagyományosan szükségesek

voltak ahhoz, hogy egyenleteket vezessünk be a természeti jelenségek matematikai leírásaként:

a) Ha a kezdeti feltételek adottak, létezniük kell az egyenletek jövőre vonatkozó megoldásainak, vagyis: *létezniük kell megoldásoknak.*

b) Kezdeti feltételek adott csoportja nem vezethet az egyenletek egynél több megoldásához, vagyis: *a megoldásoknak egyedieknek kell lenniük.*

c) A kezdeti feltételekben okozott kis változások csak kis változást okozhatnak a későbbi időpontra vonatkozó megoldásokban, vagyis: *a megoldásoknak stabilnak kell lenniük.*

Nem világos, hogy mások miért kívánták azt, hogy a természeti törvények ennyire korlátozottak legyenek. A természet összes fontos törvényét kaotikus viselkedést mutató s így Hadamard harmadik kritériumát megsértő egyenletek írják le. Nincs olyan elméletünk, amely megsértené a második kritériumot, ha a kezdeti feltételeket pontosan ismertnek tekintjük. A kvantumelmélet azonban a fenti kritériumoknak csak akadémikus értelemben engedelmeskedik, amennyiben a hullámfüggvény térbeli és időbeli viselkedését leíró Schrödinger-egyenlet kielégíti az *a)* és *b)* kritériumot, de a hullámfüggvény persze megfigyelhetetlen. A megfigyelhető mennyiségeket a Schrödinger-egyenlet statisztikus, nem pedig determinisztikus módon adja meg, és egy kvantumrendszeren elvégzett két azonos kísérlet eltérő *megfigyelt* eredményt adhat. Einstein általános relativitáselmélete nem engedelmeskedik Hadamard első kritériumának. Egy meglehetősen nagy tömegekből álló rendszer viselkedését leíró egyenleteinek nem létezik megoldása minden jövőbeli időpontra, hanem „szingularitásba" mennek át, amikor a fizikai változók végtelenné válnak, és a teret és időt nem lehet többé matematikailag definiálni. Lehet, hogy ez a betegség a gravitáció vonzóerő jellegének fizikai következménye, nem pedig Einstein egyenleteinek valamilyen nem realisztikus tulajdonsága, amely fizikailag elfogadhatatlanná teszi őket.

Az utóbbi tíz évben a kaotikus jelenségek tanulmányozása húzóágazattá vált. Ahhoz, hogy a káosszal sikeresen tudjunk foglalkozni, egy sor alapvető dologgal szembe kell néznünk. Kaotikus jelenségek azonosítása a természetben a kiindulási feltételek bizonytalanságánál mélyebb problémát eredményez. Képzeljük el, hogy matematikailag le akarunk írni egy igen bonyolult folyamatot, mint például egy teljesen kinyitott vízcsapból vagy egy vízesésből folyó víz viselkedését. Az ilyen folyadékzűrzavart „turbulenciá"-nak nevezzük. Rendkívüli bonyolultsága miatt a turbulenciát irányító törvények problémája hosszú ideig buktató volt a fizikusok számára. Ha megfigyeljük a víz bonyo-

lult kifolyását egy fürdőszobai csapból, akkor láthatjuk, hogyan keverednek a víznek a csapból egymáshoz közel kifolyó részei egymástól messze, amint a kifolyó víz a kádban lévővel keveredik. A jelenség lassított megfigyelésének jó módszere, ha a kavargó vízhez néhány csepp tintát vagy festéket adunk. A tinta nyúlványai rövid idő alatt bonyolult mintázatokba csavarodnak. Eredetileg egymáshoz közeli részei, visszavonhatatlanul összekuszálódva, különböző helyekre kerülnek. Ehhez hasonlóan bonyolult, érzékeny jelenségekkel szembekerülve a hagyományos matematikai fizikába vetett bizalmunk meginog. Ha a rendszer kezdeti állapotának megadásában elkövetett jelentéktelen hiba a jövőbeli állapotra vonatkozó, teljesen helytelen jóslást eredményezhet, még akkor is, ha a viselkedését szabályozó törvényeket tökéletesen ismerjük, mi a helyzet akkor, ha e törvényeket csak tökéletlenül ismerjük? Az 5.5 ábrán a jelnek a kör kerületén való mozgatását előíró szabály kismértékű megváltoztatásának, az eredeti szög 2,1-del való szorzásának 2 helyett, messzeható következményei lennének néhány lépésen belül. A kaotikus természeti jelenségek leírásában használt képletek legkisebb hibája teljesen használhatatlanná teszi őket a gyakorlatban. Tekintettel arra, hogy minden általunk levezetett elmélet tartalmazni fog tökéletlenségeket, közelítéseket vagy elhanyagolt, illetve nem is gyanított zavaró tényezőket, nyilvánvalóan bajban vagyunk, amikor egyenleteket kell alkalmaznunk kaotikusan bonyolult jelenségek leírásakor.

Mi történne azonban akkor, ha felhagynánk az *egyetlen* igazi, a kérdéses kaotikus folyamatot pontosan leíró egyenlet reménytelen keresésével, és ehelyett *az összes lehetséges egyenlet* közös tulajdonságainak felfedezésére összpontosítanánk?

Éppen ez a nagyratörő terv az, amelynek megvalósításába a fizikusok nemrégiben belekezdtek. A fizikai helyzetek tökéletes matematikai modelljének kutatása átadta helyét az összes lehetséges matematikai modell tulajdonságai kutatásának, és e modellek csak nagyon tág, pusztán a tanulmányozott probléma típusának körvonalazásához elégséges korlátozásoknak tesznek eleget. Ha tisztán akarjuk látni, hogy ezt miképpen teszik, először látnunk kell, milyenek a természet tanulmányozásában alkalmazott egyenletek.

Egyenletek

> A fizika nem azért matematikai természetű, mert olyan sokat tudunk a fizikai világról, hanem azért, mert olyan keveset: csak matematikai sajátságait fedezhetjük fel.
>
> Bertrand Russell

A gyakorlatban a fizika törvényei differenciálegyenletek, a fizikai rendszerek jövőbeli állapotának a jelenlegi konfigurációból való meghatározására szolgáló algoritmusok. „Megoldani" a differenciálegyenletet azt jelenti, hogy megtalálunk egy kifejezést, amely megmondja, hogy milyenek lehetnek tetszőleges jövőbeli állapotok tetszőleges kezdeti állapotból kiindulva, és hogy ezek hol és mikor jelentkeznek majd. A differenciálegyenletek a matematika nyelvének leghatékonyabb dialektusa a természet működésének leírásában. Könnyedségüket három, egymástól független elemükre vezethetjük vissza:

a) Az *algoritmikus szerkezet*, vagyis az, hogy milyen módon határozzuk meg a jövőbeli állapotot a jelenből.

b) A kezdeti állapot vagy *peremfeltételek*, ahogyan általában nevezik őket.

c) Különböző, az algoritmus alkalmazása során nem változó állandó mennyiségek. Ezeket nevezzük természeti *állandónak*.

Amint korábbi fejezetekben említettük már, egyes szimmetriaelvek lehetővé teszik az *a)* algoritmus természeti törvényként elfogadható formáinak előrejelzését és levezetését. Bizonyos korlátozásoknak kell érvényesnek lenni rájuk ahhoz, hogy összhangban legyenek a világ megfigyelésével, és így egyetemesen alkalmazhatók legyenek. A *b)* és *c)* tulajdonságokkal kapcsolatban azonban a helyzet egészen más. A kezdeti feltételek és a természeti állandók a világ olyan lényeges tulajdonságai, amelyeket mai felfogásunk szerint nem törvények határoznak meg. Nincs módunk a kezdeti feltételek megszabására; ezek adottak számunkra. Einstein általános relativitáselmélete a világegyetem időbeli változásának jó leírását adhatja, de nincs olyan törvényünk, amely megmondja, hogy milyen volt a világegyetem kezdeti állapota. Tettek már javaslatokat a kezdeti feltételek „törvényeire" (ezeket a 6. fejezetben fogjuk tárgyalni), de ezek alig többek spekulációnál.

Szabadságunk a kezdeti feltételek meghatározásában, amely feltételekre a természeti törvényeket alkalmazni lehet, furcsa és kétélű vonás. Közönséges és egyedi problémákra, mint például egy rakéta röppályájára történő alkalmazása során a rakéta mozgástörvényének a megengedett kezdeti feltételektől való függetlensége az, ami a törvény egyetemességét biztosítja. Alkalmazható bármilyen sebességgel indított rakéta pályájának leírására. Ha a törvény csak bizonyos indítási sebességekre volna érvényes, akkor alig lenne több, mint egyes megadott rakéták mozgásának leírása. A természeti törvények kezdeti feltételektől való függetlensége – használhatóságuk mércéje. A kozmológiai problémában azonban ez az egyetemesség zavaróvá válik. Csak egyetlen világ-

egyetem létezik, de a fejlődését szabályozó Einstein-egyenletek megengedik a kezdeti feltételek szabad megválasztását. Úgy látszik, hogy léteznie kellene egy elvnek, mely e kezdeti feltételeket valahogyan korlátozza.

Egyenleteink harmadikféle, mindenhol jelenlévő elemei az arányossági tényezőként jelentkező *c)* természeti állandók. Sajnos, ez esetben sincs „törvényünk", amely meghatározná, hogy milyennek kell lenniük. A 2. fejezetben megtárgyaltuk Newton gravitációs törvényét, mely azt állítja, hogy két tömeg közötti vonzóerő egyenesen arányos tömegük szorzatával, és fordítottan arányos a közöttük lévő távolság négyzetével. Az arányossági tényezőt gravitációs állandónak nevezzük. Newton törvénye maga után vonja, hogy értékét bármely két, tetszőleges távolságra lévő tömeg esetében ugyanakkorának kellene találnunk, de számszerű értéke megtalálásának egyedüli módja az, hogy megmérjük a gravitációs vonzóerőt különböző, eltérő távolságban lévő tömegpárok között. Az elméleti fizika egyik fő célkitűzése, hogy kiderítse a természeti törvényeket leíró egyenletekben megjelenő állandók pontos számszerű értékének okát. Sok fizikus meg van győződve arról, hogy előbb-utóbb képesek leszünk az alapvető állandók értékeit kiszámítani, és megadhatjuk a világegyetem kezdeti feltételeit egy belső ellentmondás-mentességen alapuló elv segítségével, amely felfedi, hogy egy és csakis egy logikai lehetőség létezik az összes állandó értékére vonatkozóan. Még messze vagyunk attól, hogy erre képesek legyünk, és még messzebb annak elképzelésétől, hogy milyen módon tudjuk meg valaha is, hogy helyesen és véglegesen tettük-e meg.

Az *a), b)* és *c)* alkotóelemeknek együttesen van egy jó tulajdonságuk, amely az egyik oka annak, hogy miért olyan hasznosak a differenciálegyenletek a tudósok számára. Elegánsan elválasztják a világról való tudásunkat tudatlanságunktól. A törvény (*a)* alkotóelem) formáját pontosan le tudjuk vezetni, jóllehet talán semmit sem tudunk a kezdeti feltételekről (*b)* alkotóelem), és csak durva méréseink vannak a problémában szerepet játszó egyetemes állandókról (*c)* alkotóelem).

Akit kételyek mardosnak, talán joggal nyugtalankodhat amiatt, hogy a „kezdeti feltételek" és a „természeti állandók" fogalma onnan ered, hogy előnyben részesítjük a három elkülönült *a)* – *c)* alkotóelemmel rendelkező egyenleteket. Például lehet, hogy van valami furcsaság a kezdeti feltételek elképzelésével kapcsolatban. Amikor Newton mozgástörvényeit használjuk egy test mozgásának előrejelzésére, akkor kezdeti feltételként meg kell adnunk kiindulási helyzetét és sebességét. Ám van valami különös a „kezdeti sebesség" fogalmában, mert a differenciálegyenletekben a sebesség fogalma magában foglalja a részecske helyzetének képzetét mind a kezdeti állapotban, mind pedig egy végtelenül kicsiny időtartammal később.

Lehet, hogy a kezdeti feltételek és természeti állandók pusztán nevek a világ ama vonásaira, amelyeket a törvények kifejezésére általunk választott formák nem határoznak meg. Előfordulhat, hogy közel sincs olyan alapvető jelentőségük, mint amilyennel felruháztuk őket.

Törvény nélküli törvény

A törvény nem ismerete nem mentség.

Egy bíró

Mi reményünk van arra, hogy talán megtalálhatjuk egy bonyolult, kaotikus folyamat leírásában esetleg használható összes lehetséges egyenlet tulajdonságait? Első látásra úgy tetszik, hogy a válasz: egyáltalán semmi. Bármi, ami megtörténhet, valamilyen egyenlet megoldása lesz, így nem létezhet az *összes* lehetséges egyenletre vonatkozó hasznos információ. Bármi, amit az összes egyenlet megoldásáról együttesen mondhatnánk, oly gyenge állítás volna, hogy nem lenne semmiféle gyakorlati érdekessége. Az a tény azonban, hogy a csak nagyon kis valószínűséggel fellépő helyzetek nem érdekelnek bennünket, lehetővé teszi figyelmünk leszűkítését azokra az egyenletekre, amelyek bizonyos értelemben *valószínű* választási lehetőségek az összes lehetséges egyenlet gyűjteményéből. Ez pedig kizár olyasfajta eseményeket, mint amikor egy leejtett tű tökéletesen kiegyensúlyozva a hegyével ér földet, és örökké megmarad ebben az érzékeny egyensúlyi helyzetében. Elvileg semmi sem tiltja meg ennek bekövetkeztét, de megfigyelése fölöttébb valószínűtlen, mert a helyzet legkisebb megzavarása lerombolja a tökéletes egyensúlyt. Instabil. A legkisebb eltérés teljesen megváltoztatja a végeredményt. Ha kizárjuk az ehhez hasonló értelemben sajátos egyenleteket, mert egy végtelenül kicsiny változás más stabil egyenletekké alakítja őket, akkor a továbbiakban csak a *majdnem minden* egyenleteket tartalmazó gyűjtemény képviselői maradnak meg. E gyűjtemény rendelkezik azzal a tulajdonsággal, hogy ha egyik tagját kissé megváltoztatjuk, akkor megoldásai megtartják a gyűjtemény egyéb tagjaihoz minőségileg hasonló tulajdonságaikat. Ha egy egyenletet, mely nem tagja ez utóbbi gyűjteménynek, kissé megváltoztatunk, akkor is úgy viselkedik, mint az előző, első gyűjtemény egyik tagja. Figyelemreméltó módon a „majdnem minden" egyenletgyűjteménynek vannak nem triviális általános tulajdonságai. Nevezetesen kimutatták, hogy kaotikusan megjósolhatatlan viselkedést mutatnak, amikor a bonyolultság egy bizonyos szintjét meghaladják.

A fenti megközelítési mód hatalmas előrehaladáshoz vezetett a turbulens és kaotikus természeti jelenségek megértésében. Ezek a jelenségek jellemzőek abban az értelemben, hogy a természetben megvalósulnak. Nem kívánják meg rendkívül sajátos körülmények érzékeny egyensúlyának fenntartását (eressze csak meg a vízcsapot). Ez azt jelenti, hogy olyan egyenlet fogja leírni őket, amely az egyenletek „majdnem minden" változatának a családjába tartozik. Ezért anélkül, hogy a turbulens mozgás pontos fizikai törvényeit ismernénk, remélhetjük, hogy bizonyos tulajdonságait le tudjuk írni. Mostanában élénk érdeklődés mutatkozik e terület iránt, mert úgy látszik, hogy az egyenletek „majdnem minden" néven emlegetett halmazát csoportokra lehet osztani, amelyek számos, látszólag eltérő tagot tartalmaznak. Mégis, egy-egy csoport összes tagja rendelkezik bizonyos közös tulajdonságokkal. Ezeket a csoportokat *univerzalitási osztályoknak* nevezik. Létük isteni adománynak bizonyulhat a nagyon nehéz problémák megoldásában, mert ha egy első látásra kezelhetetlen egyenlet azonos osztályba sorolódik egy könnyűvel, akkor figyelmünket bizakodással szűkíthetjük az egyszerűre, tudván tudva, hogy a nehezebb egyenlet megoldása hasonló általános tulajdonságokkal fog rendelkezni.

Az egyenletek valamely nagy osztályának a legfeltűnőbb általános tulajdonsága az események ama sorozata, amelynek révén rendezett viselkedésből kaotikusba esnek vissza. Képzeljük el, hogy egy folyadék sima, rendezett módon áramlik, de egy fúvóka szabályozásával áramlását gyorsabbá vagy lassúbbá tehetjük. Amint a fúvókát egyre jobban kinyitjuk, a változások meghatározott sorozata történik. Először az áramlás T periódusú hullámzásba vált át; aztán, amint a fúvókát nyitjuk, az áramlás kissé szabálytalanabbá válik, és mintázata $2T$ idő alatt ismétlődik meg, később csak $4T$ idő alatt, majd $8T$ idő után, és így tovább, amíg csak a fúvóka egy adott állásánál a megjósolhatatlan káosz állapota be nem következik. Ebben az állapotban a folyadékáramlás mintázatának megismétlődéséhez végtelen hosszú idő szükséges. Egyáltalán nem mutat ciklikus előrejelezhetőséget. Az események ilyen sorozatát találták a kaotikus természeti folyamatok egy kiterjedt osztályának eredeténél. Függetlenül ama fizikai rendszer részleteitől, amelyben a végső káosz megjelenik, a fenti „perióduskétszereződési" átmenetet gyakran megtalálhatjuk. De a leginkább figyelemre méltó az, hogy a perióduskétszerezés sebessége, amint megközelíti a kritikus értéket, ahol a periódus végtelenné válik, minden esetben ugyanaz. Ha a perióduskétszerezés n-edik esete akkor történik, amikor a fúvóka állásának értéke k_n, akkor amint n-et növekedni engedjük, k_n kritikus k^* értékét az alábbi kifejezés szerint közelíti meg:

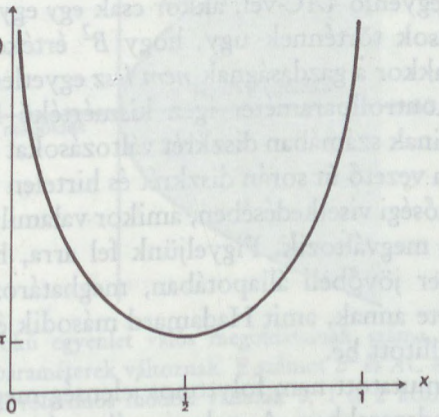
$$k_n - k^* \propto D^{-n},$$

ahol D = 4,669 201 609 102 9... pusztán egy szám, amelynek értéke minden esetben ugyanaz. Emez „univerzalitási" jelenségnek a legegyszerűbb példája az alábbi algoritmus:

$$x_{n+1} = Ax_n(1 - x_n), \tag{5.1}$$

ahol A 1 és 4 közé eső, szabályozó változóként kezelhető szám. Az algoritmus lehetővé teszi az x mennyiség $(n + 1)$-edik értékének teljes meghatározását n-edik értékéből. Az algoritmus rendelkezik azoknak a folyamatoknak a jellemző tulajdonságával, amelyekben a születés (az első, Ax_n formájú tag a jobb oldalon) és a halál (a második, $-Ax^2_n$ tag a jobb oldalon) vetélkednek egymással. Ha kiválasztjuk az $n = 1$ kezdőértéket, és kiszámoljuk x értékeinek sorozatát A értékének különböző megválasztása mellett, akkor határozott mintázatot kapunk.

Amikor A közel van 1-hez, x_1, x_2, x_3, ... egymásra következő értékei periodikusak. Ha nagyobb értéket választunk A-nak, akkor a periódus 1-ről 2-re, 2-ről 4-re, 4-ről 8-ra növekszik, folyamatosan kétszereződve, amíg ki nem választjuk az A = 3,5699 kritikus értéket. Ennél az értéknél a kimenet aperiodikussá válik, és a káosz folytatódik, amint A-t 4-ig növeljük. Az algoritmus kimeneti értékeinek valószínűségi eloszlása nagyszámú iteráció után meghatározott formájúvá válik. Ezt mutatja az 5.6 ábra az A = 4 esetre.



5.6 ábra. Az (5.1) egyenlettel megadott algoritmus egymásra következő kimeneti értékeinek hosszú távú, egyensúlyi valószínűségi megoszlása: $P(x)$

A perióduskétszereződést mutató kaotikus rendszerek bonyolultságának egyenletes növekedése azzal a ténnyel kapcsolatos, hogy a kontrollparaméter minden olyan értékénél, ahol perióduskétszereződés történik, az áramlás

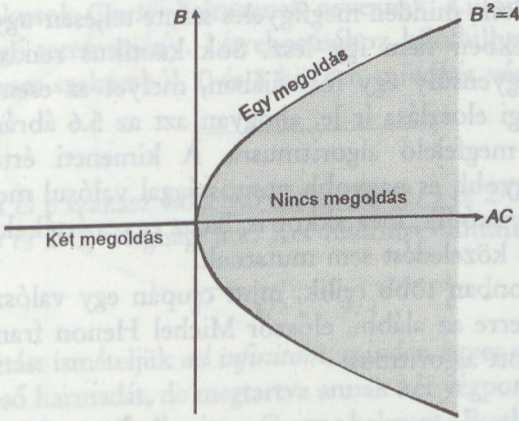
jövőbeli alakulásának két elkülönült típusa jöhet létre ugyanabból a pillanatnyi állapotból. Amint a kritikus értéket megközelítjük, az elkülönült viselkedési módok száma ugrásszerűen nő. Ez a szaporodás különös, mert jelentéktelen egyenletes változás nem folytonos változást okoz valami olyasmiben, mint egy adott egyenlet létező megoldásainak száma. Mégis, ilyesmi roppant egyszerűen megtörténhet. Képzeljük el, hogy az angol gazdaságnak X számú stabil állapota van, amelyeket különböző, részben szabályozható tényezők, mint például infláció, export, munkanélküliség stb. határoznak meg. Nevezzük ezeket A-nak, B-nek és C-nek. A szemléltetés kedvéért tegyük fel, hogy ezek a változó tényezők az X egyensúlyi helyzetet az alábbi másodfokú egyenlet szerint határozzák meg:

$$AX^2 + BX + C = 0 \qquad (5.2)$$

A fenti egyenlet valós megoldásainak száma fogja megadni, hogy a gazdaságnak hány különböző egyensúlyi állapota lehet. Ez a szám azonban B^2 és $4AC$ relatív nagysága szerint változni fog, amint azt az 5.7 ábra mutatja. Ha egy adott pillanatban úgy alakul a helyzet, hogy B^2 kissé nagyobb $4AC$-nél, akkor *két* különböző megoldás fog létezni. Ha azonban a körülmények úgy változnak meg, hogy B^2 egyenlő $4AC$-vel, akkor csak *egy* egyensúlyi állapot lesz, és ha további változások történnek úgy, hogy B^2 értéke csak kicsivel is $4AC$ értéke alá csúszik, akkor a gazdaságnak *nem lesz* egyetlen lehetséges egyensúlyi helyzete sem. A kontrollparaméter igen kismértékű folytonos változása az egyenlet megoldásainak számában diszkrét változásokat okoz. Hasonlóképpen, a rendből a káoszba vezető út során diszkrét és hirtelen változások jelenhetnek meg a rendszer minőségi viselkedésében, amikor valamilyen környezeti behatás csak szemernyit is megváltozik. Figyeljünk fel arra, hogy az egyediség eme hiánya egy rendszer jövőbeli állapotában, meghatározott kezdeti feltételek után, szöges ellentéte annak, amit Hadamard második és harmadik kritériuma „természetesnek" állított be.

Az 5.7 ábrán bemutatott nem folytonos jelenség meglehetősen mindennapi esemény fizikai rendszerekben. Annak vizsgálata, hogy ezek a nem folytonos változások hogyan jelennek meg, kultuszjelleget öltött azután, hogy René Thom francia matematikus *A szerkezetek stabilitása és a morfogenezis* című klasszikus munkájában általános csodaszerként felkarolta. E megközelítésmód Christopher Zeeman javaslatára *katasztrófaelméletként* vált ismertté, és bizonyos mértékben az itt leírt filozófia kiterjesztése, minthogy az összes lehetséges természeti törvény tulajdonságait deríti fel, függetlenül részletes formájuktól. A katasztrófaelmélet egy sor pontos matematikai eredményre épül,

amelyek azt bizonyítják, hogy ha egy sima felület leírása nem ismert ugyan, de meghatározott számú és tetszőleges módon változó paramétertől függ, akkor a rendszer viselkedésének bármely nem-folytonos hely közelében meghatározott formájúnak kell lennie. Mindez azt eredményezte, hogy a katasztrófaelméletet mindenféle bonyolult folyamat, mint például börtönlázadások vagy elmebetegségek modellezéséhez segítségül hívták, ahol nem ismerünk semmiféle alapul szolgáló matematikai modellt. Feltételezve, hogy a kérdéses jelenséget kisszámú kontrollparaméter szabályozza, a katasztrofális folytonossági hiányok és közelükben a változások természete előrelátható. Nyilvánvaló azonban, hogy az eredmények csak annyiban megalapozottak, amennyiben az alapjukul szolgáló feltevések azok, például az ismeretlen modellben szereplő kontrollparaméterek száma. Mindazonáltal az általános jellegű nem folytonos változások felderítése megvilágított számos optikai jelenséget, amelyekben kausztika és diffrakció fordul elő.



5.7 ábra. Az (5.2) másodfokú egyenlet valós megoldásainak száma, amint az egyenletben szereplő A, B és C kontrollparaméterek változnak. E számot B^2 és AC egymáshoz viszonyított értékei szabják meg, és nem folytonos módon változik 0, 1 és 2 között, még ha A, B és C egyenletesen változnak is

Ez a fajta hangsúlyeltolódás szemlélteti a jelenlegi matematikai gondolkodást a természet bonyolultságáról. A múltban hagyományosan kiválasztottak egy problémát, és szabatos egyenletet kerestek leírására. Ma azokat a tulajdonságokat keresik, amelyek közösek a legáltalánosabb egyenletekben és a legbonyolultabb folyamatokban, azokban, amelyeknek eredendő bonyolultsága a tudósok számára lehetetlenné teszi a működésüket pontosan leíró

szabatos egyenletek megtalálását. Amikor a múltban a fizikusok nagy bonyolultságú természeti jelenségekkel kerültek szembe, sietve statisztikus megközelítési módokat választottak. A turbulenciát statisztikus folyamatként közelítették meg. Ezt a sztochasztikus vonást pusztán a megoldás elérésének kényelmes volta miatt fogadták el. Nincsen semmi eredendően nem determinisztikus a turbulenciával kapcsolatban. Az utóbbi években megpróbálták visszaállítani a bonyolult turbulens folyamatok vizsgálatában a *determinisztikus* megközelítési módot, amelyben kaotikus viselkedésük okát a kis változásokkal szembeni eredendő érzékenységükre vezetik vissza. Az ilyen folyamatok elvileg teljesen determinisztikusak, de mert a bármely pillanatban mutatott pontos állapotukra vonatkozó információnk szükségszerűen hiányos, statisztikai leírást választunk, amely arról ad képet, hogy egy hosszabb megfigyelési periódusban mit fogunk látni. A megfigyeléseknek ismételhetőnek kell lenniük ahhoz, hogy hasznosak legyenek, és olyan gyakran ismételhetőnek, amilyen gyakran csak kívánjuk. Megfigyelések egész sorozatával mindig nyerhetünk valószínűségi eloszlást. Egyes esetekben, amikor a rendszer nem kaotikus, az „eloszlás" triviális lesz, minden megfigyelés szinte teljesen ugyanazt az értéket adja, de más esetekben nem így lesz. Sok kaotikus rendszer előbb-utóbb megállapodik az egyensúly egy formájában, melyet az események meghatározott valószínűségi eloszlása ír le, ahogyan azt az 5.6 ábrán bemutattuk az $A = 4$ értéknek megfelelő algoritmusra. A kimeneti értékek egyensúlyi eloszlása mind nagyobb és nagyobb pontossággal valósul meg, amint a rendszer evolúciója folytatódik, még akkor is, ha az egyes értékek semmiféle adott határértékhez való közeledést sem mutatnak.

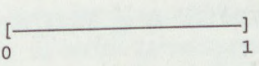
A káoszban azonban több rejlik, mint csupán egy valószínűségi eloszlás. Tanulságos példa erre az alábbi, először Michel Henon francia asztrofizikus által tanulmányozott algoritmus:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= y_n + 1 - 1{,}4x_n^2 \\ y_{n+1} &= 0{,}3x_n \end{aligned} \tag{5.3}$$

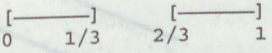
A képletek azt mutatják, hogy miképpen számolják ki determinisztikusan az x és y változók $(n + 1)$-edik értékét n-edik értékükből, $n = 1, 2, 3, \ldots$ esetekre. Ennélfogva ha $x_0 = 0$ és $y_0 = 0$, akkor $x_1 = 1$, $y_1 = 0$, $x_2 = -0{,}4$, $y_2 = 0{,}3$ stb. Ez az algoritmus kaotikus abban az értelemben, ahogyan korábban megtárgyaltuk. A kezdeti állapotban fennálló kis bizonytalanság gyorsan megsokszorozódik. Ha x_0 és y_0 kezdeti értékeit 0,631-nek és 0,189-nek választjuk, és az algoritmus ismételt alkalmazásával kapott összes következő értékeiket

koordináta-rendszerben ábrázoljuk, akkor különös módon strukturált diagramot kapunk (5.8 ábra). Nagyszámú iteráció után a kimeneti értékek eloszlása jellegzetes formát vesz fel. A kimeneti pontok legnagyobb sűrűségű területei az *x*–*y* sík azon részeit jelzik, ahol a valószínűségi eloszlásnak csúcsa van. Az ábrában azonban egy figyelemreméltó sajátság rejtőzik. Ha megnézzük az *a)* ábra egy részének – *b)* – kinagyított képét, amelyben a pontok vékony csíkokba kihúzva láthatók, akkor azt látjuk, hogy egy kinagyított csík további finomszerkezetet tár fel, csíkokban csíkok, és azokban újabb csíkok (vesd össze a *c)*-vel). Ha egyre nagyobb és nagyobb felbontással folytatjuk a mintázat vizsgálatát, a kimenő mintázat szerkezetének és bonyolultságának mindig újabb szintjét találjuk. A kaotikus kimenet tartalma sohasem fakul egységes képpé. Bár létezhetnek általános törvényszerűségek, amelyek megszabják, hogy a kimeneti pontok számának növelésekor egy új struktúra milyen gyorsan jelenik meg, véges leírással kimeríthetetlen, irreducibilis bonyolultság jön létre tetszőleges mikroszkopikus dimenzióban.

A Henon-leképezés soha véget nem érő szerkezetének lényeges eleme az, amit a matematikusok *Cantor*-halmaznak neveznek. Különös, a semmi és valami határán lebegő teremtmény. Létrehozásához kiindulhatunk egy egységnyi hosszúságú egyenes szakaszból, 0 és 1 között, mindkét végpontot beleértve:



Távolítsuk most el e szakasz középső harmadát (1/3 és 2/3 között) úgy, hogy végpontjait (1/3 és 2/3) meghagyjuk. Két részintervallumunk marad:



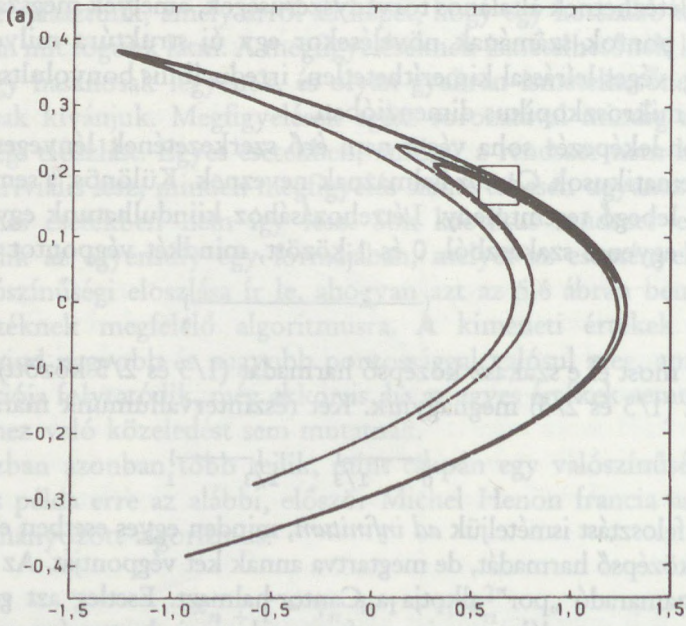
Most ezt a felosztást ismételjük *ad infinitum*, minden egyes esetben eldobva minden darab középső harmadát, de megtartva annak két végpontját. Az e műveletek végére visszamaradó „por" alkotja a Cantor-halmazt. Esetleg azt gondolhattuk volna, hogy ez a maradék semmit sem fog tartalmazni, de nem így van. A maradvány Cantor-halmaznak nulla hosszúsága van, mert a szakasz eldobott részének hossza az eldobott hosszak végtelen mértani sorának összege:

$$1/3 + (2 \times 1/9) + (4 \times 1/27) + (8 \times 1/81) + \ldots = 1$$

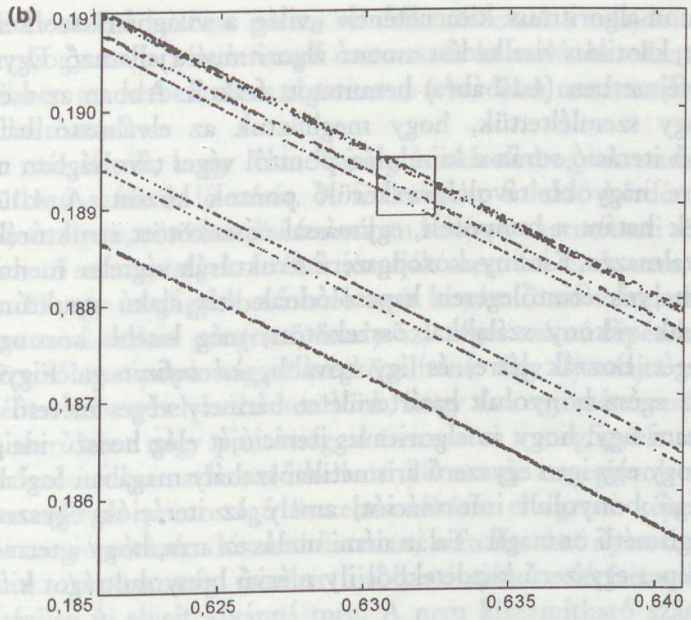
Mégis megszámlálhatatlanul végtelen számú pontot tartalmaz, és ennélfogva dimenziója nem nulla, mint egy egyedülálló ponté, amelynek hosszúsága zéró. Előállításához több információra van szükség, mint egyetlen pont esetében, de nem annyira, amennyi egy vonal megadásához szükséges. A dimenziók e

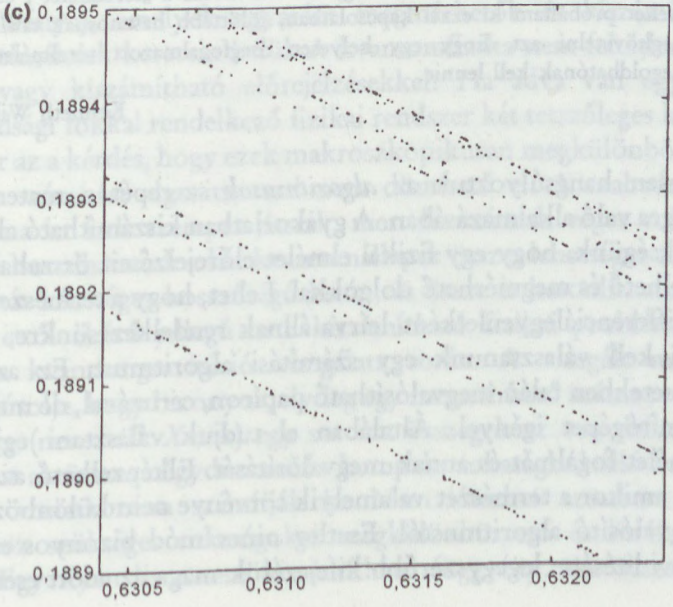
(Hausdorff-dimenziónak nevezett) kötetlen mértékének nem szükséges egész számnak lennie, és a fenti esetben egyenlő log(2)/log(3) = 0,6309-del. A Henon-leképezés végső állapotai olyan szerkezetet alakítanak ki, melyet egy egyenes és a Cantor-halmaz szorzata ír le (emlékezzünk arra, hogy egyenest egyenessel szorozva síkot kapunk, egyenest körrel szorozva pedig hengert).

Az előállításához szükséges információ szempontjából az eredmény az egyenes és sík közti átmeneti valami, bár be lehet mutatni síkban, mert geometriai dimenzióinak (a minden egyes pontja térbeli helyzetének megadásához szükséges koordinátáknak) száma még mindig kettő.



5.8 ábra. Henon különös attraktora. *a)* Az (5.3) egyenletben megadott algoritmus eredménye tízezer iteráció után, x = 0,631 354 48 és y = 0,189 406 34 kezdeti értéket választva; x értékeit vízszintesen, y értékeit függőlegesen ábrázolták. *b)* Az *a)* ábra bekeretezett részének kinagyítása, amely a jelenlévő szerkezet mennyiségének növekedését mutatja. A kiszámított pontok számát százezerre növelték, a szerkezet jobb kirajzolása érdekében. *c)* A *b)* ábra bekeretezett részének kinagyítása, amely további alszerkezeteket mutat. Az ábrázolt pontok számát egymillióra növelték. A vizsgálat a szerkezet egymásba skatulyázott szintjeinek hierarchiáját tárja fel. Minden egyes szinten hasonló az általános szerkezet, ha figyelembe vesszük a méreteket. Az „önmagához hasonlóság" jellemző a szövegben tárgyalt Cantor-halmazra is. (A szerző szíves engedélyével az alábbi közleményből: M. Henon: A Two-dimensional Mapping with a Strange Attractor. *Communications in Mathematical Physics* 50, 69–77.)


(b)
0,191
0,190
0,189
0,188
0,187
0,186
0,185
0,625
0,630
0,635
0,640


(c)
0,1895
0,1894
0,1893
0,1892
0,1891
0,1890
0,1889
0,6305
0,6310
0,6315
0,6320

A Henon-algoritmus kimenetének „világ a világban" szerkezete számos bonyolult, kaotikus viselkedést mutató algoritmusra jellemző. Egy másik példa erre a 4. fejezetben (4.10 ábra) bemutatott fraktál. Abban az esetben a mintázatot úgy szemléltettük, hogy meghúztuk az elválasztó határvonalat a nagyszámú iteráció során a kiindulási ponttól véges távolságban maradó és az attól egyre nagyobb távolságra kerülő pontok között. A 4.10 ábra sötét területének határa a bonyolult, egymással összekötött struktúrák feneketlen kútját tartalmazza. Kicsiny, korongszerű struktúrák végtelen mennyisége rejlik benne, amelyek érintőlegesen kapcsolódnak szív alakú struktúrákhoz; ezek megint csak vékony szálakkal összekötött, még kisebb korongok végtelen mennyiségét hozzák létre, és így tovább, *ad infinitum*. Figyelemreméltó módon az egész bonyolult határterületet bármely véges méretű részéből elő lehet állítani úgy, hogy az algoritmus iterációját elég hosszú ideig folytatjuk. Látjuk, hogy egy igen egyszerű aritmetikai szabály magában foglalhat végtelen mennyiségű bonyolult információt, amely az iterációk egyszerű művelete révén megismétli önmagát. Talán némi utalás ez arra, hogy a természet milyen módon képes egyszerű kezdetekből ily mérvű bonyolultságot kifejleszteni.

Kiszámíthatók-e a természet törvényei?

> Amikor arról gondolkodtam, hogy mi fán terem a „térelmélet", és ötleteket próbáltam ki ezzel kapcsolatban, fölöttébb hasznosnak találtam megkövetelni azt, hogy egy helyesen megfogalmazott térelméletnek megoldhatónak kell lennie.
>
> Kenneth Wilson

Erőteljesen hangsúlyoztuk az *algoritmusok* szerepét a matematikának a fizikai világra való alkalmazásában. A gyakorlatban kiszámítható algoritmusokra van szükségünk, hogy egy fizikai elmélet előrejelzéseit összehasonlíthassuk a megfigyelhető és megmérhető dolgokkal. Lehet, hogy a természeti törvények parciális differenciálegyenletként leírva állnak rendelkezésünkre, de megoldásukhoz ki kell választanunk egy számítási algoritmust. Ez az algoritmus egyszerű esetekben talán megvalósítható papíron, ceruzával, de meglehet, hogy szuperszámítógépet igényel. Általában el tudjuk választani egymástól egy fizikai elmélet fogalmát és annak megvalósítását. Elképzelhető azonban olyan helyzet is, amikor a természet valamelyik törvénye nem különböztethető meg az őt megvalósító algoritmustól. Esetleg nincs mód bizonyos eseménysorozatok lerövidítésére: legegyszerűbb kifejezésük maga az adott eseménysorozat

lesz. Egy véletlenszerű sorozat persze rendelkezik ezzel a tulajdonsággal, de előfordulhat, hogy nem véletlenszerű sorozatok hasonló kezelhetetlenséget mutatnak. Ebben az esetben nincs algoritmus a kérdéses matematikai elmélet gyakorlati alkalmazására.

Korábban már láttuk, hogy Alan Turing és mások hogyan mutatták ki a nem kiszámítható számok létezését. A fizikusokat érdeklő kérdés az, hogy léteznek-e vajon olyan, matematikai formában kifejezett természeti törvények, amelyek mérhető mennyiségek értékét jósolják meg, ám ezek nem kiszámítható számok. Ha egy megfigyelhető érték nem kiszámítható szám, akkor nem létezhet olyan mechanikus program, amely azt véges számú lépések bármely sorozatával tetszőleges pontossággal megközelítené. Egy ilyenfajta természeti törvény esetében abba a helyzetbe kerülünk, hogy van egy számszerű előrejelzés, amelyet nem lehet nagy pontossággal összevetni a megfigyelt tényekkel, mert az ellenőrzési folyamathoz elő kellene állítanunk a megjósolt szám és a mért érték tetszőleges pontosságú összehasonlítását elvégezni képes algoritmust. Mivel a megjósolt szám kiszámíthatatlan, nem létezhet ilyen összehasonlító algoritmus. A pontosság minden újabb szintjének elérése a közelítési eljárás minőségileg új elveit kívánná meg. A nem kiszámítható számokat az újdonság feneketlen kútja definiálja. Ezért van úgy, hogy semmiféle pusztán mechanikus algoritmus nem képes kimeríteni tartalmukat.

A klasszikus fizika fogalmai és állandói tartalmaznak számokat (például a „π") és dimenzió nélküli fizikai mennyiségeket (például az elektron és proton tömegének aránya), amelyek egyaránt megmérhetők és kiszámíthatók az atomfizikai elméletek keretein belül. A kvantumfizika nem feltétlenül szolgál eldönthető vagy kiszámítható előrejelzésekkel. Ha adva van egy végtelen számú szabadsági fokkal rendelkező fizikai rendszer két tetszőleges kvantumállapota, akkor az a kérdés, hogy ezek makroszkopikusan megkülönböztethetők-e, semmiféle számítási algoritmussal nem dönthető el. A szabadsági fokok végtelen száma itt kulcsszerepet játszik, mert ha számuk véges volna, akkor egyszerűen felsorolhatnánk a két kvantumállapot összes lehetséges makroszkopikus állapotát két véges hosszúságú listán, és össze is hasonlíthatnánk őket. Egy másik, ettől eltérő jellegű nem kiszámítható fizikai probléma újabban merült fel a kvantumgravitáció vizsgálata során. A vizsgált matematikai elmélet megjósolja, hogy bizonyos, elvileg egy megmérhető számot meghatározó mennyiség (nevezzük X-nek) egy sorozat összegeként van definiálva, és e sorozat tagjait az összes négydimenziós kompakt sokaságból álló halmaz egy-egy elemére vonatkozóan számítják ki. Nem létezhet azonban az összeg kiszámításához szükséges sokaságokat megkülönböztető és listába rendező algoritmus. Egy ilyen lista nem kiszámítható függvény. Az összeg minden

egyes tagjának kiszámításához eltérő és minőségileg új (az előző lépésekből nem levezethető) elképzelés szükséges. Ez a példa nem bizonyítja ugyan, hogy X nem kiszámítható - mert értékére létezhet más, a nem kiszámítható műveleteket elkerülő matematikai kifejezés –, de figyelmeztet arra, hogy a világegyetem bármely „végső" elméletének mélységes rejtélyei mögött könnyen meghúzódhat egy nem kiszámítható matematikai struktúra. Ez esetleg még természetes elvárás is lehet egy olyan elmélettel kapcsolatban, mely a világegyetemhez hasonló, egyedi objektumokra vonatkozik. Nem szükséges, hogy bármiféle megvalósulása legyen, leszámítva persze a világegyetemet.

A fizikai kiszámíthatatlanság fenti két példája meglehetősen ritka. Most ismertetésre kerülő utolsó példánk alapvetőbb. Kimutatták, hogy ha a közönséges differenciálegyenletek alábbi őstípusát tekintjük:

$$dy/dx = F(x,y),$$

ahol F folytonos, kétszer nem differenciálható függvény (ez azt jelenti, hogy bár megrajzolhatjuk a ceruza hegyének felemelése nélkül, éleket és csúcsokat tartalmazhat, például olyat, amilyet a kúp csúcsánál találunk), akkor még abban az esetben is, ha az F függvény esetleg kiszámítható, az egyenletnek nem feltétlenül lesz kiszámítható megoldása. Ez a probléma a parciális differenciálegyenletek esetében is fennáll. Ha a hullámegyenleteket a tér egynél több dimenziójában terjedő hullámokra nézve vizsgáljuk, akkor pontosan ugyanettől a problémától szenvednek. Ha a hullám kezdeti, térbeli formáját a folytonos, de kétszer nem differenciálható G függvény adja meg, akkor még az esetben is, ha G kiszámítható, a hullámfüggvénynek esetleg egyetlen kiszámítható megoldása sem létezik. Egydimenziós hullámterjedés esetén ilyesmi nem történhet: a kezdeti feltételek kiszámíthatósága elegendő garancia a kiszámítható megoldások létezésére. A fenti eredmény első ránézésre rendkívül nyugtalanítónak látszik. A hullámegyenletek és a fent bemutatott közönséges differenciálegyenletek a természet leírásában alkalmazott differenciálegyenletek csaknem összes változatát magukban foglalják - az agyhullámok, anyaghullámok, gravitációs hullámok látszólag mind benne vannak. Úgy látszik azonban, hogy a simaságnak az F és G függvényben megkövetelt hiánya elengedhetetlenül szükséges a kiszámíthatatlansághoz. Ha F és G kétszer differenciálható függvény, akkor a differenciálegyenletek megoldásai mindig kiszámíthatóak. A simaság e szintjét hagyományosan úgy tekintették, mint az F és G függvény fizikai realitásának feltételét, de nem tudjuk, hogy ez helytálló-e. Molekuláris szinten (és az alatt) a folyadék áramlása megszámlálhatatlanul sok ütközés láncolata, amelyek az ütközés pillanatában a klasszikus felfogás szerint a folytonosság

hiányát mutatják. Azt nem értjük teljesen, hogy a kvantumképben mi történik. Differenciálegyenleteink egyedi találkozásokat leíró egyedi algoritmusok milliárdjainak átlagolt leírásai. Még ha kiszámíthatóak is, még mindig fennáll az a lehetőség, hogy a mögöttük meghúzódó egyedi leírások nem azok.

A kozmikus kód – egy végső spekuláció

> Ez az ... elmélet [Shannon elmélete] annyira általános jellegű, hogy nem kell megmondanunk, miféle szimbólumokról beszélünk, lehetnek írott betűk vagy szavak, hangjegyek, beszéd, szimfonikus zene vagy képek. Az elmélet elég mély ahhoz, hogy az általa feltárt összefüggések megkülönböztetés nélkül érvényesek legyenek rájuk és a kommunikáció minden más formájára.
>
> Warren Weaver

Ha a tudományos kutatás folyamatáról azt gondoljuk, hogy az nem egyéb, mint egy nekünk szánt üzenet dekódolása, akkor Claude Shannonnak, az információ amerikai teoretikusának klasszikus munkája megtanít minket arra, hogy – némileg meglepő módon – az üzenet dekódolását tetszőleges pontossággal végre lehet hajtani, még zaj és az üzenetet eltorzító interferencia jelenlétében is. Különböző címzettek megkaphatják ugyanazt az *üzenetet*, olyan pontossággal, ahogyan csak kívánják, még ha esetleg a jeleknek nem ugyanazt a sorozatát kapják is meg, vagy a kommunikáció eltérő formáit használják. A gyakorlatban persze a jeleknek csak akkor lesz ilyen ellenállóképességük a zajjal szemben, ha a kommunikációba jelentős mértékű redundanciát építettek, vagyis sokkal többféle jelet használnak, mint amennyi az üzenet továbbításához a zaj távollétében szükséges volna. Továbbá ahhoz, hogy a jelhűség tetszőlegesen magas szintjének ígéretét megvalósítsuk, az üzenetet sajátos módon kell kódolnunk. Valamilyen különös, metaforikus módon a természet látszólag ilyen kényelmes formában „rejtjelezett". A természetnek sok megfigyelője és értelmezője van, akik eltérő időben és különböző helyeken számos hasonló és változatos tényt, illetve megfigyelést, vagyis információt gyűjtöttek össze. Ezeket a kutatókat mind zavarja a „zaj" valamilyen formája: személyes előítélet, tökéletlen vagy hiányos adatok, hibák, az emberi elme benső, kanti gondolatkategóriái, kísérleti kiválasztási hatások vagy kulturális torzítás. Mégis lehetséges – Shannon felfedezése alapján – bizonyos üzeneteket tetszőleges pontossággal felfogni, mégpedig mindennemű torzítás ellenére, ha az üzenet forrása rendelkezik egy bizonyos tulajdonsággal. Ha „üzenet"-en a természeti törvényeket értjük, akkor azt a meggyőződésünket, hogy a világra vonatkozó

megfigyelések átszűrése az emberi tudaton ártalmatlan dolog, abbéli hitünkként értelmezhetjük, hogy megfejtettük az üzenetet, függetlenül a jeleket részben eltorzító zaj jelenlététől. A magas jelhűséghez szükséges redundancia a kísérletek és megfigyelések ismételhetősége formájában rendelkezésre áll, és abban is, ahogyan a természet különböző vetületeibe látszólag hasonló struktúrák épültek be. Talán az a bizonyíték, hogy oly sok felszínes torzulás és a megközelítési módok zavarba ejtő sokasága ellenére a természeti törvények összefüggő képet adnak, ahhoz hasonlítható, hogy a törvények valamilyen értelemben „optimális kódolással" rendelkeznek. Lehetséges-e vajon, hogy mindebben a matematikának mint a fizikai világ leírásának váratlan hasznossága tükröződik?

6

Léteznek-e természeti törvények?

Nincs törvény azon kívül, hogy nincs törvény.

John A. Wheeler

Eretnek nézetek

Az eretnekség két ortodoxiát összekötő híd csupán.

Francis Hackett

A káosz gyakran spontán módon vezet a rendhez. A körülöttünk lévő atomok véletlenszerűen mozognak, mindegyik a maga útján, nagy méretekben mégis viszonylagos rend uralkodik. A kényszermentes gazdasági rendszert mozgató piaci „erők" sok millió egyén véletlenszerű, független döntéseiből tevődnek össze, mégis összefüggő, általános irányt hoznak létre. Nem létezik a biológiai fejlődés menetét évmilliókon át irányító evolúciós „törvény", csak az alkalmazkodás és a túlélés független eredményeinek statisztikája. Földünk növény- és állatvilága mégis tagadhatatlanul „rendezett". A dolgok ilyetén állása láttán ésszerű feltenni a kérdést, nem lehetséges-e, hogy a világegyetemben sem tevékenykedik „láthatatlan kéz"? Lehetséges, hogy egyáltalán nincsenek is természeti törvények? Az általunk tapasztalt mindenféle rend talán csak annak a különleges típusú, teljes törvény-mentességnek és függetlenségnek a megnyilvánulása, ami előrejelezhetőséghez vezet?

A múltban gyakran felismerték azt a tényt, hogy a természet számos szabályszerűsége a véletlenben gyökerezik. Ezt általában csak az igen nagyszámú eseményből következő átlagos egyöntetűség magyarázatára szokták felhozni, melynek fennállása esetén egyedileg minden esemény determinisztikus törvényeknek megfelelően történik. Schrödinger így ír erről a helyzetről:

> Az egyedi folyamatok vagy szigorú szabályszerűséggel történnek, vagy nem. A tömegjelenség megfigyelt szabályszerűségében az egyedi szabály-

szerűséget (ha van ilyen) nem kell külön tényezőként figyelembe venni. Ellenkezőleg, sok millió egyedi folyamat átlagolása az egyedi szabályszerűséget teljesen eltakarja, mert számunkra csak az átlagérték figyelhető meg. Az átlagértékek a saját, tisztán *statisztikus szabályszerűségüket* mutatják.

Az a tény, hogy mikroszkopikus egyedi eseményeket nem figyelünk meg, azt jelenti, hogy a molekuláris mozgások törvényei a megfigyelés szempontjából nem elsőrendű fontosságúak. A természetről szerzett benyomásunkban nagyszámú egyedi mozgás átlagos viselkedése a mérvadó. És minél nagyobb a megfigyelt tárgyak halmaza, annál kisebb a rá jellemző, minimális szintű és véletlenszerű fluktuáció. Annak ellenére azonban, hogy a Schrödinger által említett típusú folyamatokban a mikroszkopikus rendetlenségből nagy méretekben rend alakul ki, ő mégsem azt próbálja bizonyítani, hogy ezek az egyedi mozgások nincsenek szigorú mozgástörvényeknek alávetve. Csak bonyolultságuk miatt látszanak rendetlennek, és – ahogy a 3. fejezetben bővebben kifejtettük – csak azért kell a statisztikus leírást választanunk, mert ezt a bonyolultságot nem vagyunk képesek matematikailag kezelni, nem pedig azért, mert a molekulák mozgásában valami sajátos véletlenszerűség volna. Mi több, a statisztikus szabályosságokat, a determinisztikus törvényekhez hasonlóan szintén ellenőrizhetjük.

Most azzal a szélsőségesebb elképzeléssel szeretnénk foglalkozni, mely szerint az egyedi jelenségeket kormányozó törvények maguk is statisztikus eredetűek. Ez azzal a következménnyel jár, hogy nem lehetnek pontosak. Hosszú evolúciós időszak után, aszimptotikus állapotként jöhettek létre. A szabályszerűség megjelenése tehát mindössze arról tanúskodik, hogy a világegyetem keletkezése óta igen-igen hosszú idő telt el.

Bár a keresztény Nyugat örökölte a természeti törvények változhatatlanságába vetett hitet, ezt mindig enyhítette a „csodák" lehetőségében való bizakodás. Ebben nem láttak ellentmondást, hanem e két nézet együttélését ama nézet bizonyságaként magyarázták volna, hogy a természeti törvények kívülről rendeltettek a világegyetem fölé, s nem a természet holisztikus vagy benső tulajdonságai. Más hagyományos vallásokban a kánoni természeti törvényektől való eltérés lehetősége általában sokkal nagyobb, mert nincs a priori vagy hasonló ok arra, hogy a természet belső jellege összekapcsolódjék a törvényes következetességgel és szabályszerűséggel.

Az ősi pogány hiedelmek legtöbbje fokozottabban hangsúlyozza a kivételes természeti jelenségeket, mint a szabályszerűségeket. Egymással versengő istenségek csatáznak, hogy akaratukat a világra kényszeríthessék. Marduk felkoncolja az istenek anyját és a szörnyek szülőjét. Testét szétszaggatják, és

ebből formázzák az eget és a földet. Az ilyen történetekben a világ mulandó uraival együtt változtatja jellegét.

Már beszéltünk arról, mekkora szerepet játszott e hitrendszerek egyikének vagy másikának uralkodó volta a természet előrejelezhetőségével és törvényességével kapcsolatos állásfoglalások némelyikének kialakításában. Míg az ókor embere vonzódott a melodramatikus teremtéstörténetek iránt, amelyekben a természet rendje a titánok összecsapásából születik meg, a középkori Európában különös félelem alakult ki minden iránt, amit nem értettek, és ami bármilyen formában törvénytelen volt. Egy újabban bizonyítást nyert, hátborzongató példa erre az a tény, hogy a középkorban megszokott dolog volt állatokat (még rovarokat is!) perbe fogni és „bűntényekért" megbüntetni. Vizsgálati fogságban tartották őket, ügyvédi képviseletet kaptak, néha fel is mentették őket – mindez az állam számára jelentős kiadással járt. Mi idézhetett elő ilyen képtelen viselkedést? Valószínűleg az a mélyen gyökerező érzés, hogy a természetes világban mindent a törvénynek kell irányítania, hogy annak fennhatósága és szankciói alól senki nem mentesülhet.

Az egyházatyák korszakának elején Arnobius apologéta úgy érvelt, hogy mivel a természet „kezdetben elrendelt" törvényei a kereszténység beköszöntésével nem omlottak össze, ez azt bizonyítja, hogy az általa prédikált hitnek nincs semminemű szörnyű, természetellenes összetevője, amely – ha az emberiség elfogadja – felbomlasztaná a természetet. A Nyugat-Európában kifejlődött tudományos kultúrát, amelynek örökösei vagyunk, a természeti törvények teljes változatlanságához való ragaszkodás uralta, ez a kultúra tehát elkötelezte magát a tudományos vállalkozás értelmes volta mellett, és bízott annak sikerében. Ez szélsőséges álláspont. Lehet, hogy még igaz is. De ha mégsem az? A másik szélsőség, vagyis az ősi mítoszteremtő gondolkodást jellemző kaotikus, törvények nélküli világ látszólag teljes ellentmondásban áll az általunk tapasztalt világgal. De vajon tényleg ellentmondásban áll-e vele? Lehetséges, hogy nincsenek természeti törvények? Vagy lehetséges-e az, hogy a ma, holnap és mindörökké érvényesnek tartott törvények időben lassan változnak, vagy a világegyetem különböző pontjain különbözőek? Vajon a természeti törvények mindenütt érvényesek a világegyetemben? Megismerkedtünk már a kozmológusok érveivel, melyek szerint a világegyetemnek volt egy időbeli kezdete, amikor a természeti törvényeknek érvényüket kell veszteniük. Lehetnek-e ma is olyan részei a világegyetemnek, ahol nem érvényes semmilyen természeti törvény?

Két tűz között

Egy igazán pőre lélek nem gondolhatja, hogy a világ teljességgel megérthető. Lehetnek irracionális dolgok, lehetnek rideg tények, nyílhatnak sötét mélységek, melyek láttán az értelmet csöndre inti a megzavarodástól való félelem.

George Santayana

Ha a természet alapvető lényegét valóságos törvények kormányozzák, nem változhatnak-e ezek az idő múlásával vagy helyről helyre a világegyetemben, hasonlóan az általuk irányított anyag- és energiaterekhez? Ez gyakran felmerülő elmélet, számos tudományos-fantasztikus történet alapja. De mit is jelent? Ismét gondosan meg kell különböztetnünk a természeti törvényekről való beszéd két különböző módját. Beszélhetünk egyrészt a világegyetem, illetve belső működése jelenlegi leírásáról. Ez a leírás olyasmi, ami állandóan változik és fejlődik. Némelyek szerint ez az ideiglenesség a világ bármely tudományos (nem vallásos) leírásának szükségszerű tulajdonsága. Leírásunk egyes részei tudtunkon kívül bármikor teljességgel helytelenek lehetnek. Olyan ez, mint a felfedezők rajzolta térkép. A rajta kirajzolt terület egyes részeit sok kutató bejárja, míg másokat csak bizonytalanul tájékozódó vagy zavaros beszámolót adó felderítők pillantanak meg messziről. Ez a térkép azonban egészen más, mint az, amelyet vidéki kirándulásainkon használunk, mert az nem csak azt mondja meg, hogy mi mindent lehet látni, hanem azt is, hogyan kapcsolódnak egymáshoz a látnivalók. Sőt mi több, előre jelzi, mi található ott, ahová a sarkon befordulunk, vagy a térkép következő oldalán. Még megkapóbb, hogy mikrostruktúrája furcsán összefügg azzal, ahogyan tanulmányozzuk. Jobban hasonlít egy számítógépes interaktív videojátékra, mint egy hadműveleti térképre.

A természeti törvények e leíró jellegű térképe időben változhat, és nyilvánvalóan változik is. A tudósok még azon is vitatkoznak, hogy melyik a térkép legjobb kiadása az adott időpontban. De mi a helyzet azzal a mögötte rejlő valósággal, amelynek a térkép csak tökéletlen ábrázolása: változhat-e időben és térben? Végül is azt láttuk, hogy az egész világegyetem a dinamikus változás állapotában van, galaxisok száguldanak elfelé egymástól állandóan növekvő sebességgel, és megtanultuk azt is, hogy a tér és az idő szerkezete sem rögzített és változhatatlan. Tulajdonságait lokálisan határozza meg a benne lévő anyag és energia változó mintázata. Lehet, hogy a természeti törvények olyan sebességgel változnak, ahogy a világegyetem tágul, avagy lokálisan meghatározottak, ugyanúgy, mint a tér és az idő geometriája. Erre a csábító javaslatra

határozott nemmel válaszolhatunk. Ha vannak olyan természeti törvények, amelyek térben és időben változnak, akkor vagy van egy szabály, amely meghatározza, hogyan változnak, vagy nincs. Ha van ilyen szabály, akkor egy még alapvetőbb, változhatatlan törvényre bukkantunk, ám ha nincs, akkor nincsenek természeti törvények. Vagy léteznek állandó és változhatatlan törvények, vagy nincsenek törvények. Nem számít, hogy ismerjük-e őket, vagy sem. Ha azt találjuk, hogy az általunk invariánsnak tartott törvények változnak, ez a mi ostobaságunkat, nem pedig a természet pontatlanságát mutatja.

Érdekes megjegyezni, hogy még Maxwell is tévesen ítélte meg ezt a kérdést. Azt állította, hogy minden természeti törvény időben változatlan abban az értelemben, hogy leírhatónak kell lennie explicit időváltozót nem tartalmazó differenciálegyenlettel. Az időváltozót explicit módon tartalmazó egyenlet azonban matematikai műveletekkel egy másik, az előzővel egyenértékű, az időváltozót explicite nem tartalmazó egyenletté alakítható. Az új egyenlet az eredeti egyenlet időbeli változásait irányító invariáns törvényt adja meg. Maxwell követelménye nem zár ki semmilyen differenciálegyenletet, mert bármilyen változási törvény levezethető valamilyen más mennyiség állandóságából.

Ha valóban nem volnának természeti törvények, miből vennénk ezt észre? Csak akkor vonhatjuk kétségbe egy törvény igazát, ha más törvényeket igaznak feltételezünk, hogy az ésszerű összehasonlításhoz rendelkezésre álljon egy keret. Az ember tagadhatatlanul hajlamos a valóban létezőknél több szabályosságot és mintázatot látni a természetben és indokolatlanul általánosítani, mégpedig anélkül, hogy észrevenné tévedését. Érthető melléktermék ez a világról nyert tudásunk rendszerezésére irányuló tevékenységnek. Az utóbbi húsz évben azonban a fizikusok legalább annyi haladást értek el általtermészettörvények kiselejtezése által, mint újak felfedezésével. Sok, egykor változatlannak hitt mennyiségről kiderült, hogy parányi eltéréseket mutat. Hagyományos megmaradási törvények kérdőjeleződtek meg; a természet számos látszólagos szimmetriája közelebbi vizsgálatra „majdnem"-szimmetriának bizonyult; valaha megszokott módon tömeg nélkülinek tekintett elemi részecskéket, mint a neutrinó, ma ugyanolyan megszokott módon kicsiny, de nullánál nagyobb tömegűnek tartunk. Ha valaki tíz évvel ezelőtt olyan tudományos közleményt próbált volna megjelentetni, amely azt állítja, hogy a neutrinónak tömege van, valószínűleg csaknem olyan nehezen tudta volna elfogadtatni bármelyik tudományos folyóirat szerkesztőbizottságával, mint ma egy olyan közleményt, amely feltételezi, hogy a neutrinó tömege nulla! Tagadhatatlanul a több törvénytől a kevesebb felé haladunk, és vágy munkál

bennünk aziránt, hogy elhiggyük: minden, amit kifejezetten nem tilt valamelyik fizikai elmélet, kötelező. Ez talán egészséges jele annak, hogy egy végső, egységes „mindenségelmélet", a logikai és fogalmi takarékosság csúcsa felé haladunk, amely nem tartalmaz fölösleges elemeket. Most különállónak és össze nem függőnek tekintett törvények egyetlen, egyedülálló leírásban egyesülnének. Ebben hisz az alapvető kérdésekkel foglalkozó fizikusok zöme. Lehetséges azonban, hogy a természeti törvények érvénytelenítése egy másik útra vezet, melynek végén az a felismerés áll, hogy nincs ilyen végső „minden létező elmélete": egyáltalán nincsenek törvények.

Ez a gondolat első látásra felháborító és értelmetlen. Az embert elsősorban a fizikai világban megfigyelhető rend indította az öncélú tudományos kutatásra. Hogyan zárulhatna ez a kutatás azzal az eredménnyel, hogy mindez csupán illúzión alapult? A természet azonban szövevényesebb ennél. Láttuk, hogy nagyszámú tárgy rendezett viselkedése, akár molekulák ezek, akár csillagok, töméntelen „véletlenszerű" ütközés következménye. Azért érvényesül egy rejtett irányzat bizonyos típusú egyöntetűség felé, mert ezek mindegyike teljesen független az összes többitől, ugyanúgy, mint ahogy egy érmét újra meg újra fel-feldobva a „fejek" és „írások" száma egyre közelebb kerül egymáshoz. Paradox módon a számunkra ismerős világ szabályszerűségeinek zöme a véletlenben gyökerezik. A teljes zűrzavarnak vannak statisztikus szabályosságai. A teljesen determinisztikus törvényeknek szintén vannak határozott szabályszerűségei. Csak a részleges rendezetlenség sem milliókat, sem pedig pusztán egy vagy két tárgyat érintő, közbülső világát olyan nehéz leírni. A 3. fejezetben találkoztunk a kimenetelek mindenütt jelentkező Gauss-féle eloszlásával. Minél nagyobb az egymástól független, véletlenszerű események kimeneteleinek száma, annál pontosabban írja le a haranggörbe a különböző kimenetelek gyakorisági eloszlását (lásd 3.10 ábra).

Tekintsünk egy másfajta példát: ha felkeverünk egy hordó sűrű olajat, az anyag hamarosan újra kisimul, visszakerül eredeti, nyugodt állapotába, bármennyire is felkeverték. Egyes fizikusok azt firtatták, hogy párhuzamba állíthatók-e az ilyen jelenségek azzal, ahogyan a természeti törvények keletkeznek. Elképzelhetnénk egy kezdeti káoszt, melyben az elektromosság és a mágnesesség viselkedését a létező szimmetriák összessége irányítja, ami a gyakorlatban azt jelentené, hogy semmilyen szimmetria nem érvényesül. Ahogy a világegyetem tágult és hűlt, mind több és több szimmetria hatása vált elhanyagolhatóvá, míg végül mára egy került túlsúlyba az összes többi rovására, és egyedülállónak látszik. Ily módon a világegyetemnek a forró, sűrű ősrobbanástól a jelen kiritkult, hűvös kiterjedtségéig lefolyt fejlődése meghatározhatná azt a környezetet, amelyen belül a véletlen működik. Egy ilyen

világban, az ősrobbanás poklában, ahol minden szimmetria egyenrangú, látszólag nem lennének törvények, éppúgy, mint egy új országban, amely minden más állam jogrendszerét egyszerre fogadja el. Időmúltával azonban uralkodó viselkedési irányzatok bukkannának elő, mert véletlenszerű környezetben nem várható, hogy a világegyetem lehűlése során az összes különféle szimmetria pontosan egyforma gyorsasággal vesszen ki.

A dolgoknak ez az elképzelt menete csak akkor jöhet számításba, ha kimutatható, hogy a mai világegyetemben megfigyelhető szimmetriák, következésképp a velük összefüggő tényleges természeti törvények elkerülhetetlenül megjelennek, akármilyen volt is a kiindulási káosz. Érdekes megjegyezni, hogy ez a gondolat éppen az ellenkezője annak, amit manapság sok részecskefizikus elképzel. A „nagy egyesített gauge-elméletek" (Grand Unified Gauge Theories, GUTs) szerint amint megközelítjük a világegyetem tágulása történetének kezdetét, és az ősrobbanás hőmérséklete egyre magasabb, a szimmetriák egyre inkább helyreállnak. A különböző természeti erők tényleges hatásfokának változása magas energiáknál hatásaik konvergenciáját, alacsony energiáknál pedig divergenciáját eredményezi. Az általunk javasolt változat szerint a szimmetriák magas energiáknál eltűnnek, és a hőmérséklet csökkenésével visszaállnak. Ami azt illeti, ismerünk is bizonyos körülményeket, amelyek – ha érvényesülnek a természetben – megakadályozzák a „nagy egyesítés" filozófiájának megvalósulását. A 4. fejezetben megvitattuk, hogyan vezet a kvantumvákuumon belüli szüntelen aktivitás az *aszimptotikus szabadsághoz*, amelyen a nagy egyesítés lehetősége alapul. A színtöltést hordozó kvarkok erős kölcsönhatásának esetében az aszimptotikus szabadság azt jelenti, hogy a közöttük lévő tényleges kölcsönhatás magas energiájú környezetben meggyengül. Ez csak akkor történik meg, ha a különböző kvarktípusok száma nem több nyolcnál. Jelenleg csak három családról tudunk. Ha nagyon magas energiáknál még öt másik létezik, akkor ezen energiák fölött az erős kölcsönhatás mind erősebb volna, ahelyett, hogy aszimptotikusan gyengülne. Így az elektromágnesesség és a színtöltési kölcsönhatás térerőinek nem lehetne közös találkozási pontja. Ekkor az alacsony energiájú világ magyarázatát a szimmetriáknak a világegyetem lehűlése folyamán történt elvesztésében kereshetnénk.

Ez a másik okoskodás, hogy tudniillik a szimmetria mintegy „a legéletképesebb fennmaradása" révén alakul ki, inkább a „kaotikus kozmológusok" próbálkozásaira emlékeztet, akik azt igyekeznek kimutatni, hogy akármilyen módon kezdődött is a világegyetem, a kiterjedése és lehűlése alatt benne lejátszódó fizikai folyamatok miatt elkerülhetetlenül a maihoz fölöttébb hasonló végállapotba jutna. Ismét felismerhető az alapvető kérdések tudományos vizsgálatának ez a visszatérő kettőssége: egyfelől annak kimutatásával

próbálkoznak, hogy ami most létezik, nem függ attól, hogyan kezdődtek a dolgok, mert minden kezdeti állapot elkerülhetetlenül valamilyen, a maihoz hasonló irányában fejlődik tovább. A megismerhetetlen kezdeti feltételek ennélfogva nem játszanak lényeges szerepet világunk szerkezetének meghatározásában. Másfelől vannak, akik a jelen magyarázatát elsődlegesen a kezdeti feltételekben keresik, és tagadják az időbeli evolúciós hatások szerepét: „a teremtés első reggele írta azt, amit az utolsó ítélet hajnala olvas majd."

Van azonban még egy lehetséges forgatókönyv. Tételezzük fel, hogy a világegyetem valóban a kaotikus anarchia állapotában kezdődött. Ha az egyes tényleges szimmetriáknak a fejlődés során való felbukkanása a helyi hőmérséklettől és sűrűségtől függ, akkor ezek a kaotikus világegyetem különböző részeiben különböző sebességgel fognak feltűnni. Az anyag és energia komplex rendszereinek alapvető építőkövei csak ott tudnak létrejönni, ahol meghatározó szimmetriák, ennélfogva jó megközelítésben invariáns természeti törvények léteznek, és csak a rend e szigetein tudnak később az élőlényeknek nevezett, bonyolult rendszerek kifejlődni. Ha vannak a világegyetemnek olyan helyei, ahol a természet nem szigorúan tart be törvényeket, akkor nem valószínű, hogy mi ilyen helyen élnénk. Ha a tágulás jelensége ilyen heterogén világegyetemben történne, azt találhatnánk, hogy egész látható világegyetemünk egyetlen, hasonló törvényekkel és szimmetriákkal rendelkező, mikroszkopikus terület felgyorsult tágulásával alakult ki. E terület határain kívül a dolgok szó szerint elképzelhetetlenül különbözőek lehetnek.

Bár úgy vélhetjük, hogy a gauge-szimmetriák és a velük kapcsolatos megmaradó mennyiségek a világegyetemnek nagyon magas energiaállapotából a mai, nyugodt állapotába tartó fejlődés eredményeképpen jöttek létre, ennyivel igazából nem intézhetjük el a természeti törvényeket. A 4. fejezetből emlékszünk arra, hogy a gauge-invariancia – bár erős feltétel, amely képes a természeti erők formáját és hatásuk módját befolyásolni – nem határozza meg, hányféle részecske létezhet. Hasonlóképpen a gauge-szimmetria eredetének káosz-forgatókönyve is adós annak a rendkívüli ténynek a magyarázatával, hogy az anyag viszonylag kis számú, látszólag *azonos* elemi részecskéből épül fel. Mi lehetne ennél kevésbé véletlenszerű állapot?

Túl sok törvény?

„Nos, valójában elkészítettük az ország térképét, *egy az egyhez léptékben!*"
„És gyakran használjátok?" – érdeklődtem.
„Még sohasem terítettük ki" – mondta Mein Herr –, „a gazdák tiltakoz-

> tak. Azt mondták, hogy befedné az egész országot, és kizárná a napfényt. Úgyhogy most az országot magát használjuk önnön térképe gyanánt, és biztosíthatlak, csaknem olyan jó."
>
> Lewis Carroll

Érdemes valamelyest elgondolkodnunk azon a hasonlaton, mely szerint a világegyetem szerkezetének megértésére irányuló vizsgálódásunk olyan, mint a térképrajzolás. Ez gyakran használt, ám félrevezető kép. Ha mindössze *leírást* akarunk készíteni a világegyetemről, amely nem érintkezik a mögötte rejlő valósággal, csak az eligazodás hasznos eszköze – egyfajta kapós „Metagalaxis-útikalauz stopposoknak" –, akkor a tudomány előtt az a lehangoló cél áll, hogy csak a létezők egyre részletesebb leírását nyújtsa, és ne remélhesse előrelátni azt, hogy mi lesz; olyan modellt alkosson, amelynek léptéke egyre közelebb kerül az életnagysághoz. A tudomány ekkor Borges császári térképészeinek sorsára lenne kárhoztatva:

> A térképészet művészetét ebben a birodalomban olyan tökélyre fejlesztették, hogy egyetlen tartomány térképe egy egész várost foglalt el, a birodalom térképe pedig egy egész tartományt. Idővel ezek az aránytalan térképek már nem feleltek meg, és a térképészeti iskolák a birodalom méretével megegyező, azzal minden ponton egybeeső térképet szerkesztettek. A térképészet iránt kevésbé elkötelezett későbbi nemzedékek belátták, hogy ez a térkép hasznavehetetlen, és szentségtörő módon átadták az elemek pusztító hatásának. A nyugati sivatagban még fellelhetők a térkép töredékes romjai: most állatok és koldusok búvóhelye. Az ország többi részében nyoma sem maradt a földrajzi tudományoknak.

Hasonló sors vár ránk, ha csak az események időbeli menetének feljegyezésére vagyunk kárhoztatva. Eseménysorozatok katalógusát vezetnénk. Poincaré nézete szerint:

> Tételezzük fel, hogy át tudtuk tekinteni a világegyetemben az idő teljessége alatt történt összes jelenség sorozatát. Magunk előtt látnánk azt, amit *szekvenciának* lehetne nevezni; ezen az előzmény és a következmény kapcsolatát értem. Nem kívánok az állandó összefüggésekről vagy törvényekről beszélni, a különböző, megvalósult szekvenciákat külön (ha tetszik, egyénileg) szemlélem.

A tudományos módszert nem csak a sorozatok gyűjtése érdekli. Rendszerezni akarja a hasonló sorozatokat, és meg akarja érteni a hasonlóságok és különbségek kölcsönös összefüggéseit.

A káosznak van olyan formája is, melynek oka a túlzott rend, a túl sok törvény, a túlzott bonyolultság. Lehet, hogy a természet elbűvölő „egyszerűségébe" vetett bizalmunk megalapozatlan. Lehet, hogy a természet csak azért látszik egyszerűnek, mert még oly kevés titkát fejtettük meg. Ahogy mélyebbre nyúlunk az anyag és a téridő mikroszkopikus szerkezetébe, roppant nagyszámú tényező egyidejű összjátéka teremtette, rendkívüli összetettségű rétegre lelhetünk. S ez annyira törvénynélkülinek tetszhet, mint a teljes káosz.

Spontán rend

> A világmindenség csodás dolgokkal van tele, amelyek türelmesen várják, hogy elménk hozzájuk élesedjék.
>
> Eden Phillpotts

John Wheeler megdöbbentő képet fest arról, hogyan alakulhat ki rend a rendetlenségből a kollektív önszerveződés bonyolult folyamatában. Egy barkochbajátékot tár elénk, amelyben a kitalálót kiküldik a szobából, míg a többiek kiválasztanak egy szót, amelyet nem több, mint húsz „igen" és „nem" válasz segítségével kell majd kitalálnia. Ez alkalommal azonban a társaság összeesküvést sző. Amikor visszatérünk a szobába, hogy elkezdjük a kérdezést...

> mindenki mosolyog. Ártatlanul kérdezni kezdünk. A válaszok eleinte gyorsan érkeznek. Azután egyre hosszabb időbe kerül a válaszadás – különös, amikor csak egyszerű „igen"-nel vagy „nem"-mel kell válaszolni. Végül, jó nyomon érezve magunkat, rákérdezünk: „Felhő"? „Igen" – hangzik a válasz, és mindenkiből kitör a nevetés. Amikor kimentünk a szobából – magyarázzák –, abban egyeztek meg, hogy nem egyeznek meg semmilyen szóban. Mindenki saját tetszése szerint válaszolt „igen"-nel vagy „nem"-mel bármilyen kérdést tettünk is fel. Ám bárhogyan is válaszolt, olyan szóra kellett gondolnia, amely saját válaszával – és az összes megelőző válasszal – összhangban volt.

A lényeg itt az, hogy ez a kis játszma megértet valamit a 3. fejezetben a kvantumelmélet értelmezésével kapcsolatban megvitatott, megfigyelő teremtette valóság elképzeléséből. Ha Bohr szélsőséges idealizmusa igaz, és a megfigyelés aktusa ténylegesen „megteremti" a mért jelenséget, akkor a törvények és szabályos folyamatok rendezett világa, amelyet a világegyetemben uralkodó törvényekkel hoztunk összefüggésbe, nem lehet más, mint a megfigyelő teremtette valóság egy formája, amelyben a megfigyelés és a részvétel aktusai együttesen hozzák létre a valóság képét a kvantummegfigyelések „játszmájában". A

rend spontán módon jön létre. Ha Everett párhuzamos világai léteznek, akkor elágazó utak vezetnek a világegyetemek sorozatán keresztül, és ezeket bármelyik megfigyelő végigkövetheti úgy, hogy egy szabálytalan, törvények nélküli világegyetem képe rajzolódik ki előtte. A mi ösvényünk nem ilyennek látszik. Első látásra ezt Everett elmélete ellen szóló erős érvnek vélhetnénk, hiszen annyival több rendezetlen, mint rendezett ösvény vezet keresztül a hasadó világok labirintusán. A fenti érvet gyengítenünk kell azonban ama meggondolások alapján, hogy a hozzánk hasonló, biokémiailag komplex, értelmes lények számára 15 milliárd év után lehetetlen máshol, mint rendezett valóságokban élni és fejlődni. Szükségszerű lehet, hogy a kvantumvalóságnak az egyéb világok összességében atipikusnak számító, rendezett ágát népesítjük be.

Az előző fejezetben tárgyalt fajtájú kaotikus nemlineáris rendszerek felszínesen kaotikus viselkedésük ellenére rendkívül hajlamosak spontán módon rendezett struktúrákat létrehozni. Az ilyen rendszerek jellemzően olyan fizikai helyzeteket írnak le, melyekben van valamilyen kapcsolat a külső környezettel, akár folyamatos energiaátáramlás, akár a fő rendszer egyenletes, kismértékű perturbációja vagy folytonosságának megszakítása formájában. Amint a külső hatás lassan megváltozik, hirtelen változások gyors sorozata játszódik le, miközben a lokális rendszer viselkedése alapvetően átalakul. Ha például a csapból folyó víz sebességét egyenletesen növeljük, a turbulens viselkedésbe való hirtelen átmenet figyelhető meg, amely új típusú rendet valósít meg. A minőségileg új viselkedés-formákba való „elágazásnak" ez a hétköznapi jelensége, amikor a természeti törvények nemlineáris oldalai mutatkoznak meg, fontos tanulsággal szolgál. Először is megmutatja, hogy számítanunk kell hirtelen változásokra, ahelyett, hogy az új egyensúlyi állapot lassú, fokozatos fejlődés útján valósulna meg. Másodszor, azt is megmutatja, hogyan történhet meg egy összetett nemlineáris rendszer átmenete olyan rendszerbe, ahol minőségileg új típusú törvények uralkodnak. Ezek a szerveződési törvények nem állnak ellentmondásban a tanulmányozott fizikai jelenséget nagy vonalakban irányító, leglényegesebb fizikai törvényekkel, ám ezek a szerveződési törvények semmilyen értelemben nem vezethetők vissza a természet alapvető erőit és elemi részecskéit irányító alaptörvényekre. Az új struktúráknak az elágazási pontokon való megjelenésével párhuzamosan, a bonyolultság bizonyos küszöbértékének átlépésekor fölöttébb összetett rendező elvek új típusai jelennek meg. A harmadik tanulság, amit e spontán módon rendeződő jelenségekből levonhatunk, a „véletlen" helyes értelmezésének fontossága. A véletlenszerű viselkedés ösztönös értelmezése azt sugallja, hogy a rendezett viselkedés spontán megjelenése a természetben valószínűtlen. Ez a feltételezés azonban a Gauss-féle „nagy számok törvényé"-nek ösztönös mérlegelésén

alapul, amely viszont azon a feltételen alapul, hogy a lehetőségek összességét nagyszámú *független* esemény alkotja. Amikor azonban fizikai rendszerek elágazási pontokat közelítenek meg, ez a követelmény nem teljesül többé. A rendszeren belüli nagy hatótávolságú összefüggések és a külvilághoz fűződő kapcsolat külső hatások hiányában az egyensúlytól messzire hajtja a rendszert, és valószínűvé teszi a rendezett struktúrák megjelenését, szöges ellentétben azzal a helyzettel, amikor a rendszer közel van a termális egyensúlyhoz, a „nagy számok törvénye" érvényben van, és a rendezett struktúrák valószínűsége kicsiny.

A hagyományos redukcionista leírástól való elrugaszkodásnak számos érdekes párhuzama és kiterjesztése van. Általánosságban azt látjuk, hogy a fizikai helyzeteket kormányozó törvények talán rétegekben léteznek, és nem vezethetők mind vissza hierarchikusan egyetlen törvényre. A művem írásához használt szövegszerkesztő program például számos, egymást kiegészítő törvényszintet egyesít. Ott vannak a kvantum-elektrodinamika törvényei, amelyek személyi számítógépem összes elektronikus alkatrészének alapvető atomi és szubatomi szerkezetét meghatározzák. Aztán ott vannak a programozás „törvényei", melyek az áramkörökben létrehozzák a számítógép operációs rendszerét. Ott vannak továbbá a nyelvtani szabályok, vagy – videojáték esetében – a programlemezen kódolt játékszabályok. Az információ szervezésének szabályait előíró, utóbbi két törvénycsoport semmilyen értelemben nem vezethető vissza a természet elektromágneses kölcsönhatásait irányító kvantum-természettörvényekre. Az efféle redukcionizmus logikai képtelenség. Látjuk tehát, hogyan termelnek ki magasan rendezett rendszerek új hajlamokat olyan szerveződési törvények felvételére, amelyek „újszerűek" abban az értelemben, hogy a fizika törvényei szempontjából nem megjósolhatók.

Meghaladja-e az élet a természeti törvényeket?

> A „lélek" vagy „élet" fogalma az atomfizikában nem fordul elő, és még közvetett módon, természeti törvények bonyolult következményeiként sem vezethetők le. Létezésük semmiképpen sem jelzi az energián kívül más, alapvető szubsztancia jelenlétét, mindössze másfajta formák működésére utal, amelyeket nem tudunk a modern atomfizika matematikai képleteihez illeszteni... Ha lelki vagy életfolyamatokat akarunk leírni, ki kell szélesítenünk ezeket a struktúrákat. Lehetséges, hogy más fogalmakat kell majd bevezetnünk.
>
> Werner Heisenberg

...vajjon megélednek-é ezek a tetemek?

Ez 37,3

Az élet és a tudat olyan jelenségek, melyek egy bizonyos bonyolultsági szint elérésekor jelennek meg. Ezt a bonyolultsági szintet jelenleg nem vagyunk képesek sem elképzelni, sem modellezni. A létező legnagyobb számítógép információtároló és -feldolgozóképessége az emberi agyénak egyezredtől tízezredrészéig terjed. A bonyolultság magas szintje szükséges, de semmiképpen nem elégséges az olyan összetett hatások megjelenéséhez, mint a „gondolat", hiszen tudjuk, hogy még kémiai szinten is fölöttébb különleges környezet és biokémiai reakciópartnerek jelenléte szükséges a komplex működések végrehajtásához. Az élet egy számítógépes programhoz hasonlítható, mely bizonyos komplex biomolekulákon fut. Mint ilyen, éppúgy nem „magyarázható meg" a természet erőit kormányozó fizikai törvényekkel, vagy vezethető vissza azokra, mint a Pac-Man működése.

Az emberi agy szerkezete bonyolultabb, mint a természet kémiai és atomi erőit irányító alaptörvények. Alkotórészeinek szerveződési módja teszi képessé a működésre, éppen úgy, mint ahogy a számítógépet állandó huzalozása. Ha ismernénk az agy minden egyes idegszálának és sejtjének egyéni működését, az sem mutathatná meg, hogyan működnek együttesen, éppúgy, mint ahogy az emberi anatómia nem használható fel az előrejelző szociológia kiindulási pontjaként. Az ábécé ismerete szükséges, ám távolról sem elegendő a Shakespeare által elért összhatás felmutatásához. Nem létezhetnek természeti állandókat tartalmazó egyenletekkel leírható törvények a gondolatra és a tettre.

Hangsúlyoznunk kell, hogy semmilyen formában nem támogatjuk a vitalizmust, ezt a hitelét vesztett elképzelést, mely szerint az élő anyag minden más anyagtól különbözik, mert valamilyen különleges összetevőt vagy *életerőt* tartalmaz. Az élő és élettelen rendszerek közti nyilvánvaló különbség nem az alapvető atomi összetevőkben van, hanem bizonyos bonyolultsági küszöbök elérésében, ahol új, önrendező elvek léphetnek spontán módon működésbe.

A mesterséges intelligencia legelkötelezettebb rajongói operacionalista álláspontra helyezkednek, és úgy definiálják a mesterséges intelligenciát, hogy az nem más, mint az információ feldolgozásának algoritmikus oldala, azaz olyan program, mely minden bemenő adatra meghatározott kimenő adatokat termel. S mint ilyen, utánozható vagy modellezhető az ember által épített számítógéppel, amely viszont akkor nyilvánítható intelligensnek, ha semmilyen operációs eljárás nem képes megkülönböztetni az ember válaszát a számítógépétől.

Meg kell először jegyeznünk, hogy még ez a cél sem érhető el, ha az emberi agy *nem kiszámítható* matematikai függvényekkel leírható műveleteket is végez, amelyeket a Turing-gép nem képes elvégezni. Ez elképzelhető, ha a

kvantumfolyamatok az emberi agy léptékében szerepet játszanak, erre azonban még nincs bizonyíték. Ha ezt a csábító lehetőséget félretesszük, kétségbe vonhatjuk azt az operacionalista nézetet, mely szerint az intelligencia nem más, mint holmi algoritmus. Aki ezt az egyszerű nézetet elfogadja, az nem tud különbséget tenni agyunk tudat alatt vagy álomlátás közben végzett információfeldolgozó tevékenysége, valamint a *megértés* között, amelyet a tudatos információfeldolgozással kapcsolunk össze. Hogy ez a megkülönböztetés valódi különbségen alapul-e, arra egykor majd a mesterséges értelem kutatása adhat választ. Nem biztos azonban, hogy a probléma megoldásának kilátásai olyan ígéretesek, mint ahogy sokan gyermeteg módon hiszik, mert még ha a „mesterséges értelmiségi" sikerrel jár is, különös, új megértési problémákkal találja majd magát szemben. Ha egy komplex elmét építenének, akkor a meghatározásához és megértéséhez szükséges információmennyiség olyan óriási lenne, hogy korlátozó tényezővé válna. Mi több, meghökkentő tulajdonságokat is mutatna, úgy mint ésszerűtlenség, szabad akarat, szubjektivitás, és valószínűleg előfordulna, hogy kijelentené: kételkedik az emberi intelligenciában. Ezt a gépet így lehetetlen volna teljesen megérteni, és megértéséhez nemcsak számítógép-szakértőre, hanem legalább ugyanannyira pszichológusra és pszichiáterre is szükség lenne.

Az önmódosítás tulajdonsága komplex rendszerekben mind „hardver", mind „szoftver" szinten játszik némi szerepet. Nem is kell különösebben elvontnak lennie. Kiagyalhatnánk egy hardver és ROM (read-only memory – csak olvasható tár) áramkörök feljavítására képes „szakértői" rendszert, mely magán a szakértői rendszeren mechanikai és elektromos műveleteket elvégezni képes robot-motorrendszerhez volna kapcsolva.

A biológiai rendszereknek teleologikus oldalai is vannak, nem holmi nagystílű terv vagy végső ok miatt, amely felé az evolúciós folyamat egész menete irányul, és amely végső formájukat meghatározza, hanem azért, mert a komplexitás kritikus szintjét túllépő szervezetek céltudatos viselkedést tanúsítanak, s ez megváltoztathatja későbbi fejlődésük módját. Az ember már nincs kiszolgáltatva a környezeti erők és a természetes kiválasztódás kényének-kedvének, mert képesek vagyunk elképzelni és modellezni e kényszerek hatásait, nem csak tapasztalatainkból kell okulnunk. Elménk sok valószerű jövő elképzelésére tesz minket képessé, és túlélésünk valószínűségét növelendő meg tudjuk változtatni a környezetet.

Háromféle *redukcionizmust* kell megkülönböztetni: a *lételméleti redukcionizmus* szerint nem létezik életerő. A világban található összes anyag végső soron elemi részecskékre és a fizikusok által tanulmányozott típusú erőkre vezethető vissza. Legtöbb tudós ezt fogadja el.

A *módszertani redukcionizmus* szerint minden magyarázatnak determinisztikusnak kell lennie és a matematikai fizika nyelvén kell megfogalmazódnia. A komplex dolgok magyarázatát a bonyolultság alacsonyabb szintjein kell keresni, végső fokon az elemi részecskék szintjén, ahol a legáltalánosabb és leghatalmasabb természeti törvények jól átláthatóan hatnak.

Az *ismeretelméleti redukcionizmus* azt állítja, hogy a tudomány egyik területén megfogalmazott „törvények" mindig visszavezethetők más tudományterületek különleges eseteire vonatkozó törvényekre, ahogy például a pszichológia visszavezethető a biológiára, a biológia a kémiára, és a kémia a fizikára.

Fejtegetésünkből nyilvánvalóvá kellett válnia, hogy míg boldogan hiszünk a létélméleti redukcionizmus ésszerűségében, a módszertani redukcionizmus mellett nem szól meggyőző érv, és minden okunk megvan arra, hogy az ismeretelméleti redukcionizmust hamisnak tartsuk. A módszertani redukcionista ellen szólnak a kaotikus viselkedésű, állandó statisztikus tulajdonságokkal rendelkező nagy és bonyolult rendszerek. A mélyen rejlő fizikai alaptörvényektől független szerveződési törvények léte, az élő rendszerek teleologikus viselkedése, valamint az a követelmény, hogy a termodinamika II. főtétele és a táguló kozmológiai modellek megértéséhez antropomorf megfontolásokat kell bevezetnünk: mindez a módszertani redukcionista tévedését tanúsítja, azt, hogy futóhomokra alapozza elméletének építményét. Az emberi történelemnek nincsenek alapvető törvényei, sem az emberi viselkedésnek tantételei, vagy a gondolkodásnak törvényei, hanem:

> Több dolgok vannak földön és egen, Horatio,
> mintsem bölcselmetek álmodni képes.
>
> (Ford. Arany János)

Véletlen szimmetriák

> Véletlen(ség), *fn.* Változhatatlan természeti törvények hatására bekövetkező elkerülhetetlen esemény.
>
> Ambrose Bierce

A háború utáni időszak számos feltételezett természeti törvény és az őket alátámasztani vélt szimmetriák folyamatos pusztulásának volt tanúja. Ezt az irányzatot nem szabad pusztán a tudósok alkalmatlanságával magyarázni, akik

új tételekkel egészítik ki a természeti törvények listáját, még mielőtt megfelelően megvizsgálták volna őket. Inkább arról van szó, hogy a világegyetem rendkívül nagyszámú „majdnem"-szimmetriát tartalmaz, amelyek csak hajszálnyira térnek el a pontosságtól. E „majdnem-szimmetriák" némelyikének pontatlanságát csak rendkívül érzékeny technikai eszközök kifejlesztése után volt lehetséges kimutatni.

Számos érdekes példa tartozik ide. Hosszú ideig azt hitték például, hogy a fizikai folyamatokban teljes szimmetriának kell fennállnia az anyag és az antianyag között. Azaz, az elemi részecskék közti kölcsönhatások mindegyikében van egy ugyanolyan sebességű kölcsönhatás, amelyben minden részecske helyett antirészecske szerepel. Sok évig tartotta magát az a hit, hogy ez a szimmetria létezik a természetben, végül azonban kísérletileg bizonyították, hogy vannak olyan esetek, amelyek kismértékben megsértik e szimmetriát. Úgy véljük, fölöttébb szerencsés, hogy így van, mert ha a szimmetria pontos volna, az ősrobbanás egyenlő mennyiségű részecskét és antirészecskét hozott volna létre. Az ősrobbanás korai pillanataiban fennálló óriási anyagsűrűségben az anyag és antianyag katasztrofális annihilációban alakult volna sugárzássá. Ezt a pusztulást igen-igen kis mennyiségű anyag élte volna túl. A világegyetem átlagos anyagsűrűsége ma a mostaninál több mint tízmilliárdszor kisebb lenne, túl ritka ahhoz, hogy csillagok és galaxisok valaha is kialakuljanak. Ezzel szemben az anyag és antianyag között a természetben létező csekély aszimmetria azt eredményezte, hogy az anyagnak az a fajtája, amelyet (megegyezés szerint) „anyagnak" nevezünk, éppen egy kicsivel lassabban bomlott és annihilálódott, mint az általunk „antianyagnak" nevezett, úgyhogy minden milliárd proton–antiproton párból, amely fotonok keletkezése közben annihilálódott, megmaradt egy anyag-proton.

Az anyag és antianyag között fennálló csekély egyensúlyhiányhoz hasonló „majdnem"-szimmetriák a véletleneknek tudhatók be, amelyek kicsinek vagy nagynak látszanak, attól függően, milyen típusú következményükre összpontosítunk. A részecskék, valamint az antirészecskék részvételével folyó fizikai kölcsönhatások sebessége közti tényleges különbség hajszálnyi, ám kozmikus léptékben ez az egyensúly-eltolódás lehengerlő következményekkel jár.

A 4. fejezetben eltöprengtünk azon, hogy mi is az, ami a világegyetemben magyarázatra vár, és különválasztottuk a fizikai törvények következményeit képviselő dolgokat azoktól, amelyek csak véletlen eredményei e törvényeknek. A természetben található „majdnem"-szimmetriák valószínűleg olyan szimmetriasértéseknek köszönhetik létüket, melyek az egyik helyett a másik lehetséges módon végződtek, véletlen események miatt, nem pedig a természet változatlan tulajdonságai okán. Kissé aggasztó annak az eltérésnek a csekély

volta, amely miatt ezek nem tekinthetők pontos invarianciának. Hosszú időn át eszünkbe sem jutott, hogy invarianciájuk nem tökéletes. Többi, feltételezett invarianciánk is könnyen erre a sorsra juthat. Úgy látszik, hogy valamilyen mélyen rejlő okból a természet mértéktelen elfogultságot tanúsít a csekély törvénytelenség, a majdnem, de nem teljesen tökéletes szimmetria iránt.

Ahol megdőlnek a természeti törvények

Az általános relativitáselmélet magában hordja önmaga elpusztításának csíráit.

D. W. Sciama

Láttuk, hogy választanunk kell bizonyos szinten változatlan törvények és aközött, hogy egyáltalán nincsenek törvények. Létezhet-e e végletek között valamilyen átmenet? Például, létezhetnének-e természeti törvények mindenütt, kivéve a világegyetem különleges helyeit, ahol bármi megtörténhet: ahol a külvilágot kormányzó fizikai-törvények nem érvényesek? Bizony, lehet, hogy ez a helyzet. Einstein gravitációs törvényének megvan az a szokatlan tulajdonsága, hogy megjósolja: adódhatnak olyan állapotok, amelyek közepette ez a törvény nem érvényes. Előrejelzi, hogy nem tud előrejelezni. Ezek a szinguláris pontok, ahol a törvény megdől, a világegyetem szélét jelölik. A 4. fejezetben, az ősrobbanás szingularitásával kapcsolatban már volt róluk szó. Most részletesebben meg kívánjuk vizsgálni jelentésüket, és megvitatjuk létüket az ősrobbanáson kívüli helyzetekben. Először is bővítsük ki korábbi fejtegetésünket.

A távoli galaxisok az egyetemes tágulás állapotában egymástól eltávolodva száguldanak. Ha ezt az állapotot időben visszafelé extrapoláljuk, úgy látszik, hogy a múlt egy meghatározott időpontjában végtelen anyagsűrűséget találunk: az ősrobbanás néven ismertté vált *szingularitást*. Felületesen ez mind a világegyetemről készülő leírásunknak, mind a világegyetem törvényeinek kezdetét jelöli. Eleinte e szinguláris pont megjóslását a táguló világegyetem szélsőségesen idealizált matematikai képével kapcsolatos kóros jelenségnek tekintették. Einstein először azt gondolta, hogy ez csak a minden irányban pontosan egyforma sebességgel táguló modell következménye. Vegyünk el egy keveset szimmetriájából, és azt várhatjuk, hogy a táguló anyagot időben visszafelé követve, az nem érkezne egy időben egy helyre, és a szingularitás „életlenné" válna. Einstein ezenfelül azt javasolta, hogy valószerű nyomásértékek figyelembevételével a rendszer ellenállna a kompressziónak, így elkerülhető a múltbeli

szingularitás megjóslása, éppúgy, mint ahogy a léggömbben uralkodó gáznyomás ellenáll arra irányuló kísérletünknek, hogy mérhetetlenül kicsire összenyomjuk.

Sajnálatos módon Einstein egyik ellenvetése sem hozta meg az általa várt eredményt. Ahelyett, hogy elejét vették volna a szingularitás keletkezésének a múltban, inkább még súlyosabbá tették a helyzetet. Az aszimmetrikus modellekben a szingularitás a közelebbi múltba tevődött át, és a szokásos nyomásértékekkel rendelkező világegyetemekben még rosszabb szingularitások keletkeztek. Ennek oka Einstein egy másik felfedezésében rejlik: az „$E=mc^2$" képletben, mely kimondja, hogy az E energia minden formája – beleértve a nyomást is – m tömeggel egyenlő, s így a Newton által felismert fajtájú gravitációs vonzóerőt gyakorol. Ezért, amint visszafelé haladunk az időben, és megközelítjük a szingularitást, az emelkedő nyomás is hozzájárul a gravitációs nyomóerőhöz, ami több mint kompenzálja az ellenálló nyomást. A szingularitás elkerülésével próbálkozni olyan, mintha a hajunknál fogva próbálnánk magunkat felemelni.

Később ravaszabb ellenvetést hoztak fel. Mi van akkor, ha a véges múltban jelzett szingularitás csak a világegyetem térképezésének műterméke? A térképészeti földgömbön például hosszúsági és szélességi vonalakból álló hálózatot használunk, hogy a Föld felszínének pontjait egyértelműen meg tudjuk jelölni. Ezt a hálózatot koordináta-rendszernek nevezzük, mert lehetővé teszi a különböző helyek koordinálását, összhangba hozását. Ahogy az Egyenlítőtől az egyik sarok felé haladunk, a hosszúsági vonalak konvergálni kezdenek, és a sarkokon mind metszik egymást. Ezeken a pontokon a Föld felszínének leírására használt térképező koordináta-rendszer „szingularitást" mutat. Ám ha vesszük a fáradságot, és ellátogatunk a sarkvidékekre, könnyen meggyőződhetünk arról, hogy a Föld felszínén semmilyen törés nem mutatkozik azokon a helyeken, ahol térképkoordinátáink szingulárissá válnak. Ha az Északi-sark közelében utaznánk, más, megfelelőbben megválasztott koordinátahálózatot használnánk, amely semmiféle rendellenességet nem mutat a Sarkon. Honnan tudjuk, hogy az ősrobbanás szingularitása is nem ehhez a jóindulatú fajtához tartozik-e, csak a világegyetem nem megfelelő leírásának következménye, fizikai jelentősége azonban nincsen?

Elsőre úgy látszik, hogy erről igen nehéz megbizonyosodni. Tegyük fel, hogy egyik térképkoordináta-rendszert a másik után nézzük meg, és az ősrobbanás szingularitása mindegyikben megjelenik. Bizonyít ez valamit? Nem, mert végtelen számú megvizsgálandó rendszer van, és nem tudhatjuk, léteznek-e eddig még nem vizsgált koordináta-rendszerek, melyekben nincs szingularitás. S hasonlóképpen, ha felfedezünk is egy olyan koordináta-rend-

szert, amelyben a szingularitás eltűnik, még mindig el kell döntenünk, hogy miért fogadjuk el ezt, nem pedig a többit, amelyben megjelenik a szingularitás.

Ezek a kényelmetlen dilemmák kényszerítették a kozmológusokat arra, hogy nagyon gondosan definiálják, mit értenek „szingularitáson" a világegyetemben, annak érdekében, hogy elkerüljék a nyomások, koordináták és a világegyetem szerkezetében mutatkozó szimmetriák okozta bonyodalmakat. Az első lépés annak a hagyományos képnek az elvetése volt, amely szerint az ősrobbanás szingularitásában a sűrűség vagy a hőmérséklet, vagy akármi más *végtelenné* válik.

Könnyű belátni, miért nem jó kiindulási alapeszme az, amelyikben a világegyetem pontján végtelen mennyiség fordul elő. Einstein vagy valaki más elméletének egyenleteit megoldva a világegyetem olyan leírását nyerjük, mely egy téridő-térképet ad a világegyetemről. Keressük meg most ezen a térképen a „szingularitásokat", ahol a sűrűség végtelenné válik, és vágjuk ki őket a térképből. A maradék a világegyetem nem-szinguláris térképe. Valószínűleg elleneznénk ezt a bűvészmutatványt, mert az átlyuggatott világegyetem a lyukak közelében valamilyen meghatározhatatlan módon *majdnem* szinguláris-nak látszik. Sőt, ami még rosszabb, ha képesek lennénk a világegyetem leírására nem-szinguláris matematikai modellt találni, honnan tudnánk, hogy megtalálása vagy leírása közben alkalmazott módszereinkkel hallgatólagosan nem távolítottuk-e el a szingularitásokat?

Definíció szerint *szingularitás* akkor fordul elő, amikor egy fénysugár vagy egy részecske pályája véget ér. Ha ez megtörténik, akkor pályája végére érve a részecske eltűnik a világegyetemből, mert kifut a térből és az időből. Mi lehetne ennél szinguláris-abb? Másfelől részecskék születhetnének a semmiből e véges téridő-pályák végpontján (bár ennek mechanizmusáról vagy okáról definíciónk természetesen semmit sem mond). Ez jó definíció, mert ha a téren és időn át vezető pályánk lyukakkal találkozik, amelyeket azért vágtak ki a világegyetem modelljéből, mert végtelen sűrűségű pontokat tartalmaztak, akkor pályánk a lyuk szélénél éppoly biztosan véget ér, mintha egy végtelen sűrűségű pontra érkezett volna, ahol a tér és az idő összeomlik. A tovább nem folytatható pálya mindkét esetben a világegyetem szingularitását jelezné.

Számos kérdést kell még megválaszolnunk. Mit jelent egy téren és időn át haladó pálya vége, vagyis mi a szingularitás? Előfordulhatnak-e ilyen pontok a valóságban, s ha igen, hol vannak, és meg lehet-e őket figyelni?

A téren és időn át vezető pályák végpontjainak összessége a téridő széle. Szigorúan véve ez a határ nem része a világegyetemnek. Ennél a szélnél a világegyetem véget ér, hiszen sem részecskék, sem fénysugár nem létezhet tovább a téridőben. Ha erre a határra tévednénk, megszűnnénk a mi világegye-

temünkben létezni. Ez különösen hangzik. Miért kellene ott véget érnie a világegyetemnek? A kozmológusok sok időt szenteltek annak bizonyítására, hogy Einstein gravitációs elmélete biztosítja: az anyag sűrűsége vagy valamilyen más, fizikailag mérhető mennyiség mindig végtelenné válik a lehetséges világegyetemek határán. Igen gyakran ez a helyzet, s a tér és idő színtere hirtelen véget ér, mert lerombolódik – végtelen nagyságú gravitációs erők szaggatják szét. Ám nincs bizonyítva, hogy ez mindig így van. Ha mindig így volna, akkor minden szingularitás ősrobbanástípusú lenne. Ismert, hogy Einstein gravitációs elmélete tartalmazza olyan lehetséges világegyetemek példáját, amelyeknek szélét nem kíséri valamilyen fizikai mennyiség végtelenné válása. Nincs azonban még teljesen eldöntve, hogy valószínű-e ilyen helyzetek előfordulása. Mindennemű bizonyíték arra utal, hogy nem: a különleges, jóindulatú szingularitások ismert példáinak legkisebb perturbációja végtelen fizikai mennyiséget tartalmazó, ősrobbanástípusú szingularitássá alakítja őket.

A matematikusok számos szabatos tételt bizonyítottak, melyek szerint ha bizonyos megfigyelések alapján igaznak bizonyulnak, akkor a világegyetemnek tartalmaznia kell szingularitásokat, vagyis olyan helyeket, ahol a természeti törvények megdőlnek, a tér és idő megszűnik létezni. Roger Penrose és Stephen Hawking nevéhez fűződik a legerőteljesebb ilyen típusú tétel, mely szerint elvileg megfigyeléssel eldönthető, hogy létezik-e a világegyetem szélének összes előfeltétele. Melyek ezek a feltételek? Először a 4. fejezetben tárgyaltuk meg őket; idézzük fel röviden. Először, az általános relativitásnak érvényesnek kell lennie, és a gravitációnak mindenre vonzóerőként kell hatnia. Másodszor, az időutazásnak lehetetlennek kell lennie. Harmadszor, meghatározott mennyiségű anyagnak kell lennie a világegyetemben. Ezek nem ésszerűtlen feltételezések. Bizonyos, hogy mindenfajta anyagra, amellyel valaha is dolgunk volt, hat a gravitáció vonzóereje. Az emberek többsége az időutazás lehetőségét – és az ok és okozat törvényeinek azt kísérő megdőlését – bármilyen szingularitásnál elrettentőbbnek tekintené.

Miután a szingularitástétel feltételeit a világegyetem ma megfigyelhető részében érvényesnek találtuk, a matematikai logika annak elismerésére kötelez, hogy múltunkban létezik a szingularitás. Vagyis, ha a világegyetemben ma megfigyelhető összes részecske és fénysugár lehetséges múltbeli életútját időben visszafelé követjük, ezek közül legalább egynek a vele együtt mozgó személy által mért véges idő múlva véget kell érnie. Általában úgy tartják, hogy ez a szingularitás egyetemes, és valójában minden életút együtt végződik az ősrobbanásban. Csak akkor van jogunk kételkedni a szingularitás elkerülhetetlenségében, ha nem hiszünk a levezetésében használt valamelyik feltétel érvényességében.

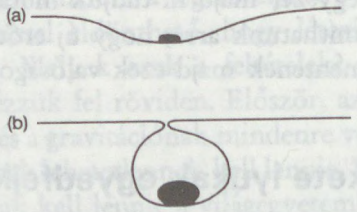
Bár a feltételeket tapasztalatunk szerint érvényesnek találjuk, tapasztalatunk kozmikus mértékkel mérve valójában meglehetősen korlátozott. Nyugalmas körülmények között élünk egy kellemes bolygón, körülbelül tizenöt milliárd évvel azután, hogy bármilyen ősrobbanás történhetett. Az anyag és az energia szélsőséges körülmények között mutatott viselkedésének kutatásában meg sem közelítettük a természetben mindennapos végleteket. Ha a világegyetem a végtelen sűrűség és hőmérséklet állapotából sugárzott szerteszét, akkor mindenféle, eddig még csak nem is gyanított jelenségek léphettek föl. Nem tudjuk, vajon a tömegvonzás mindig vonzóerő marad-e ilyen körülmények között, s még ha az marad is, a világegyetemben új taszítóerők léphetnek fel a gravitáció vonzóerejének ellensúlyozására. Csak annyit mondhatunk, hogy ha léteznek ilyen furcsa, új erők az ősrobbanás szingularitásából származó világegyetem tágulási kényszerének megelőzésére, akkor olyan magas sűrűségnél és hőmérsékleten kell fellépniük, hogy megfelelő leírásukhoz az általános relativitás és a kvantumterek nagyszerű elméleteinek egyesítésére lesz szükség. Nem szabad azonban megfeledkeznünk arról, hogy az általános relativitáselmélet által elkerülhetetlennek tartott szingularitások – mai tudásunk szerint – nem követelik meg szükségszerűen a szélsőséges sűrűség- és hőmérséklet-értékek jelenlétét. Lehet, hogy egyszer majd ki tudjuk mutatni, hogy mégis így van, ám ha így van sem számíthatunk arra, hogy új erőterek vagy az anyag antigravitációs formái megmentenek majd ezek valóságosságától.

A fekete lyukak egyedfejlődése

> A fekete lyukak a legtökéletesebb makroszkopikus tárgyak a világegyetemben: létrehozásukban kizárólag a tér és az idő fogalma vesz részt.
>
> S. Chandrasekhar

Az ősrobbanás nem az egyedüli olyan hely, ahol a téridő véget ér, és a természeti törvények érvényüket vesztik. A szingularitás létrejöttéhez szükséges feltételek a térben véges mennyiségű anyagon belül is megvalósulhatnak. Ha a nehézségi erő megfelelő mennyiségű tömeget elég kis helyre vonz, akkor az így létrejött gravitációs erőtér olyan erőssé válhat, hogy onnan semmi nem menekülhet, még a fény sem. Ennek elképzeléséhez hasznos visszaemlékezni Einstein hasonlatára, aki a teret és időt gumilepedőhöz hasonlította, melynek alakját a rajta lévő anyag jelenléte és mozgása formálja. Azokon a helyeken, ahol kis területen nagy mennyiségű anyag halmozódik fel, a téridő geometriájában olyan mély árok keletkezhet, hogy egy része „lefűződik", és elválik a

többitől (6.1 ábra). Aki-ami a levált rész foglyául esik, elszigetelődik a rajta kívüli tér és idő eseményeitől. Így jön létre a csillagászok által „fekete lyuknak" nevezett jelenség. Az ilyen nagy sűrűségű, kozmikus fénycsapdák lehetőségét már régóta mérlegelték, elsőként 1783-ban John Michell, a földtudományok egykori professzora Cambridge-ben, utána pedig 1798-ban Laplace. Mindketten megjegyezték, hogy elképzelhető olyan gömb alakú csillagászti objektum, amelyben olyan óriási tömeg van bezárva olyan kis sugarú gömbbe, hogy a szökési sebesség – az a sebesség, amelyet kilövéskor el kell érni ahhoz, hogy a test tömegvonzásától teljesen el lehessen szakadni – a fény sebességével egyenlő. Ez a kép összhangban áll Newton gravitációs elméletével, ha a fényt apró részecskékből állónak tekintjük. Mivel egyrészt a kívánt feltételek annyira szélsőségesek voltak, másrészt akkoriban a fény hullámként való felfogása sokkal népszerűbb volt, ez a gondolat abban az időben nem indított el további tudományos kutatást, bár Michell közleménye figyelmet keltett a Royal Societyben, ahol először felolvasták. Az elnök, Sir Joseph Banks a kor amerikai tudósainak írott leveleiben mint az új tudományos gondolatok legérdekesebbikét említi.



6.1 ábra. A térgeometria tömeg általi eltorzításának vázlatos képe. Egy habszivacs tömbre nehéz golyót ejtünk. Az *a)* képen egy viszonylag kis tömeg csekély görbületet hoz létre a térben, amelyet gyenge gravitációs erőtérként értelmezünk. A *b)* képen a golyó tömege olyan nagy, és a habszivacsban létrejövő mélyedés olyan mély, hogy a habszivacs bezáródik a labda körül, elvágva azt a külvilágtól. Azt mondjuk, hogy *eseményhorizont* jelenik meg. A tér és idő torzulása oly mértékű, hogy a fény nem juthat ki a külvilágba. Fekete lyuk jött létre

A csillagok a gravitáció által stabilizált, hatalmas atomreaktorok. A csillag definíció szerint olyan test, amelynek közepében a nyomás elég magas a hőmérsékletnek a spontán magreakciók megindulásához szükséges szintre emeléséhez. További életük nagy részében a gravitáció befelé irányuló erőhatásával a csillag belsejében folyó magreakciók fenntartotta, kifelé irányuló nyomás tart egyensúlyt. A csillag élettartamát az határozza meg, mennyi idő szükséges teljes hidrogénkészletének héliummá és más, nehezebb elemekké

való elégetéséhez. A leghatalmasabb csillagok élete a legrövidebb, mert ezekben lesz legmagasabb a középponti nyomás és hőmérséklet, és ezért ezek magreakciói emésztik fel leggyorsabban a „tüzelőanyagot". Amikor a mi Napunknál több mint háromszor nagyobb tömegű csillagok végül kimerítik nukleáris tüzelőanyag-készleteiket, nem tudnak ellenállni a gravitáció befelé irányuló húzóerejének. Folyamatosan egyre sűrűbb anyaggömbbé omlanak össze. E folyamat közben egy megfelelően nagy tömegnek olyan kis térfogatba kell összenyomódnia, hogy *eseményhorizont* fog feltűnni. Lokálisan semmilyen különösebb esemény nem jelzi, hogy az eseményhorizonton belülre került anyag számára nincs többé visszaút. Csak ha egy űrhajó megpróbálna korábbi pályája mentén visszatérni a távoli világegyetembe, derülne ki, hogy csapdába esett. A téridő csapdává vált részében olyan nagy mennyiségű anyag összpontosul olyan kis térfogatban, hogy az ezt elhagyni akaró tárgynak túl kellene lépnie a fénysebességet ahhoz, hogy elmenekülhessen. A menekülés útját elzáró felület határozza meg a fekete lyuk határát, vagy „eseményhorizontját".

A fekete lyuk nem szilárd test, csak egy felület a tér-időben, melyet az eseményhorizont határol. Az eseményhorizont olyan, mint egy egyirányú membrán. Semmi, ami rajta keresztül beesik, nem juthat visszafelé át rajta. Az eseményhorizonton kívül elhelyezkedő megfigyelők nem kaphatnak jelzéseket onnan belülről, a fekete lyuk eseményhorizontján belül csapdába esett anyagról nem ismerhetnek más adatot, mint annak teljes tömegét, teljes impulzusnyomatékát és teljes elektromos töltését. Ezek az általános megmaradási törvények szerint megmaradó mennyiségek, amiből megtudjuk, hogy a fizikai törvények e megmaradási törvények tükrözte invarianciákat még akkor is megtartják, ha a természeti folyamatokban fekete lyukak is szerepelnek. A fekete lyukról semmi mást nem lehet tudni, csak tömegét, elektromos töltését és impulzusnyomatékát. Más tulajdonságai nincsenek. Két azonos tömegű, töltésű és impulzusnyomatékú fekete lyukat *kívülről* semmilyen módon nem lehetne megkülönböztetni. Ez nem jelenti azt, hogy az eseményhorizonton belül található anyag elvesztette minden más tulajdonságát, csak azt, hogy a többi tulajdonság nem hozzáférhető a külső megfigyelő számára. Ebben az értelemben a fekete lyukak a természet legegyszerűbb tárgyai: nem rendelkeznek azzal a számtalan egyéni, meghatározó tulajdonsággal, amelyek még a legegyszerűbb hétköznapi tárgyakra is jellemzők.

Érdemes hangsúlyozni, hogy ez a jelenség, bár első ránézésre hasonlít a Michell és Laplace-féle által elképzelthez, valójában sokkal szélsőségesebb. Az általános relativitáselméletben és más, rokon gravitációs elméletekben a fekete lyuk eseményhorizontja abszolút gát a kifelé irányuló utazás vagy hírközlés útjában. A newtoni gravitációs elméleten alapuló Michell–Laplace-féle objek-

tum esetében attól olyan messzire lehet menekülni, amilyen messzire csak akarunk. A szökési sebesség az elérhető legmagasabb sebességgel (tudniillik a fénysebességgel) lehet egyenlő, ám a newtoni szökési sebesség a gravitációs erőtérből való teljes meneküléshez szükséges sebesség, ez pedig azt jelenti, hogy *végtelenül* messzire kell eltávolodni. A fény sebességénél kisebb szökési sebességgel a Laplace és Michell által felvázolt „fekete lyuktól" tetszés szerinti távolságra lehet eljutni. Ezt a relativisztikus fekete lyuk esetében nem lehet megtenni.

Oszlassunk el először is néhány, a fekete lyukak eseményhorizontjával kapcsolatos mítoszt. Ha áthaladnánk egy hatalmas fekete lyuk eseményhorizontján, melynek, mondjuk, a mi Napunkénál százmilliószor nagyobb a tömege (ehhez hasonlót gyanítanak sok nagy galaxis középpontjában), semmi különöset nem tapasztalnánk, legalábbis eleinte. A körülmények igen enyhék lennének. Az eseményhorizonton belül az anyag átlagos sűrűsége körülbelül a levegőéhez hasonlítana. Jelen pillanatban is mindannyian egy nagyon nagy fekete lyuk belsejében élhetnénk, s mégsem észlelnénk semmiféle rendellenességet. Ám végül, ahogy a gravitációs erő egyre közelebb és közelebb húzna a fekete lyuk középpontjához, ha véges méretű test volnánk (azaz nem idealizált, nulla kiterjedésű matematikai pont, mely esetben semmit sem éreznénk, és ugyanolyan „súlytalan" állapotban lennénk, mint amilyet gravitációs erőtérben szabadeséskor, például az úszómedencébe fejest ugorva tapasztalunk), a ránk ható árapálykeltő erő elviselhetetlen lenne. Szétszakadnánk. Ez az erő a fekete lyuk középpontja felé közeledve kérlelhetetlenül nő. Mi vár ránk a középpontban? A szingularitástételek szerint a középpontban szinguláris pontnak, a világegyetem széle egy darabjának kell lennie, amelyben az anyag végtelen sűrűségűre van összenyomva, és az ezzel kapcsolatos gravitációs erő elég nagy ahhoz, hogy a téridő képlékeny anyagát szétszaggassa. Éppúgy, mint az ősrobbanás szingularitása esetében, nem tudjuk, hogy a természetnek valamely eddig ismeretlen ereje lehetővé teszi-e e sors elkerülését. Érdekes azonban megvizsgálni, mi történik, ha valóban található egy szingularitás valamelyik fekete lyuk belsejében, hiszen ez utóbbiakból valószínűleg több milliárd létezik a látható világegyetemben.

Kozmikus cenzúra

> Korunk egyik furcsa fintora, hogy míg a laikusokba belesulykolták azt a sablonos képet, hogy a fekete lyuk a végső mesebeli rém, addig a hivatásosok szinte teljesen ellenkező nézetet vallanak, mely szerint a fekete lyukak – miként az öregedés – nem is olyan szörnyűek, a másik lehetőséghez viszonyítva.
>
> Werner Israel

A szingularitásnál minden természeti törvény érvényét veszti. Látszólag semmi sem irányítja, mi bukkan elő a szingularitásból, mint ahogy nincs ismert törvény az egész világegyetemnek az ősrobbanásból való létrejöttére sem, ha egyáltalán volt ilyen. Mindebben az a legfurcsább, hogy Einstein gravitációs elméletének egyik előrejelzése mutat rá arra, hogy az elméletnek valahol érvényét kell veszítenie. Egy ilyen természeti törvény, mint Einsteiné, magában hordozza saját pusztulásának csíráit. Megjósolja, hogy léteznünk kell olyan helyeknek a világegyetemben, ahol *bármi* megtörténhet. E pontok a világegyetem szinguláris határának részei. Van azonban valami nagyon szokatlan helyzetükben, ha fekete lyuk belsejében vannak. Itt teljesen körülveszi őket a fekete lyuk eseményhorizontjának felszíne. Nem láthatók, és nem is képesek semmilyen hatást gyakorolni a fekete lyukon kívüli világra. Ha a természeti törvények valóban megszűnnek létezni a fekete lyukak belsejében levő szinguláris pontoknál, és e szingularitásokból megjósolhatatlan dolgok bukkannak elő, éppen úgy, mint az ősrobbanásból, akkor következményeik eseményhorizontjuk felületén belülre korlátozódnak. Na már most, bár *gyanítjuk*, hogy minden esetben, amikor egy-egy csillag meghal, és nagy sűrűségűre omlik össze, létrejön egy fekete lyuk eseményhorizontja, ez nincs bizonyítva. Elképzelhető, hogy nagy sűrűségeknél az anyag és az energia magas koncentrációja térben és időben olyan szingularitás létrejöttéhez vezethet, amelyet nem vesz körül eseményhorizont. Egy ilyen *„csupasz szingularitás"* teljesen megjósolhatatlan hatást gyakorolhatna *ránk*. Olyan volna ez, mintha a világegyetem kezdeteit néznénk. Az előrejelezhetőség és a tudományos kutatás ily módon lehetővé váló összeomlása olyan visszataszító, hogy voltak, akik azzal hozakodtak elő, hogy van egy természeti törvény, mely kimondja, hogy *minden* szingularitást eseményhorizontnak kell körülvennie. Ezt a természeti törvénykezést a „csupasz" szingularitások ellen Roger Penrose, a szingularitástételt először bizonyító és a szingularitások vizsgálatát elindító oxfordi matematikus találó módon „kozmikus cenzúrának" nevezte el. Még most sem lehet tudni azonban, hogy a kozmikus cenzúra elmélete igaz-e, vagy hamis-e.

Igen egyszerű fizikai érveléssel arra juthatunk, hogy a természetben a kozmikus cenzúra bizonyos formában igaz. Tudjuk, hogy a természetben az energia meg-

maradni látszik, sőt azt is, hogy két formája van – kinetikus (mozgási) energia és potenciális (helyzeti) energia –, és a fizikai változások során e két forma átalakul egymásba. Amikor például a víz egy gát tetejéről zuhog lefelé, kevés mozgási energiával, de hatalmas helyzeti energiával indul (az utóbbi definíció szerint az a munka, amellyel kiindulási helyzetébe fel lehet emelni); amikor a hidroelektromos turbinákba ütközik a vízesés lábánál, minden helyzeti energiája mozgási energiává alakul, amely aztán elektromos energiává alakítható. Ha valóban léteznének csupasz, eseményhorizonttal nem védett szingularitások a világegyetemben, akkor minden, kívülről a szingularitásba esett anyagnak *végtelen* mennyiségű helyzeti energiát kellene veszítenie útban a szingularitás felé, és ez az energia különböző formákban visszasugárzódna a világegyetembe. Saját létezésünk azt látszik jelezni, hogy ez nem történik meg. Vagy valami nem engedi, hogy a szingularitást el lehessen érni – és ezáltal a szétsugárzott helyzeti energia mennyiségét véges értéken tartja –, vagy a szingularitás körül eseményhorizont képződik, és csapdába ejti a sugárzást, vagy mindkét lehetőség igaz. A megállíthatatlan gravitációs összeomlás következményeként fellépő csúnya „hőhalál" Laplace és Michell newtoni „fekete lyukainak" volna az eredménye.

Ha a természetben valóban előfordulnak csupasz szingularitások, akkor a természeti törvények nem teszik lehetővé, hogy előre jelezzük a jövőt. Amennyire a gravitációt értjük, a csupasz szingularitásból bármi előjöhet. Ha a természetben nem léteznek csupasz szingularitások, még mindig megfigyelhetnénk a csupasz szingularitás teljesen megjósolhatatlan kisugárzásait, de ehhez egy fekete lyuk eseményhorizontján belül kellene lennünk. Felfedezéseinkről nem tudnánk értesítést küldeni az eseményhorizonton kívülre, Földön maradt kollégáinknak, és arra lennénk ítélve, hogy megszerzett tudásunkat magunkkal vigyük a központi szingularitás örök feledésébe.

Csak egyetlen olyan helyzet van, melyben kizárólag a fekete lyuk belsejében játszódó történet a fontos. Az ősrobbanás – ha volt egyáltalán ilyen – a mi szempontunkból csupasz szingularitás volt. És közvetlen hatással van ránk. Ha a világegyetem „zárt", és a jövőben újra összeomlik majd, akkor az egész világegyetemet egy fekete lyuk belsejének képzelhetjük el, amelyen kívül nincs semmi. Minden, amit magunk körül látunk: anyag, idő, tér, természeti törvények – ennek a csupasz szingularitásnak a terméke. E dolgok azt sugallják, hogy van valamelyes rend abban, ami a csupasz szingularitásból kijön, valamilyen, a szingularitások, így többek között a kozmikus kezdeti feltételek viselkedését irányító metatörvény.

A mai kozmológiában a Teremtő szerepét lényegében a csupasz ősrobbanás-szingularitás veszi át. Egy rendkívül magas fejlettségi fokú civilizáció azonban elméletben képes lehetne lokális csupasz szingularitást létrehozni oly módon,

hogy elegendő mennyiségű anyagot elég kis helyre zsúfol össze. A szingularitások „teológiai" státusát némileg aláaknázza annak felismerése, hogy „mesterségesek" is lehetnek. Ez a helyi létesítmény lehetővé tenné, hogy elkövetői a teret és az időt egyaránt teremtsék, és pusztítsák. Ez a világegyetem teremtésének kétségkívül a nehezebbik módszere. Ha felfedeznénk, hogyan lehet átmenetet létrehozni az elemi részecskék olyan anyagfajtáinak különböző energiaállapotai között, mely anyagfajták az ősrobbanás közelében a felfúvódó tágulás periódusát élénkítik, akkor a sajátunkon belül egy másik táguló alvilágegyetemet „teremthetnénk". Megkísérelték már annak felderítését, hogy lehetséges-e ily módon világegyetemet teremteni „laboratóriumi körülmények között". Jelenleg úgy látszik, hogy ez kivihetetlen, mert ahhoz, hogy egy mikroszkopikus terület tágulása lokálisan bekövetkezzék, már egy szingularitás jelenlétére van szükség. Ez a nézet azonban még megváltozhat.

Nem ismeretes, hogy léteznek-e a szingularitások viselkedését irányító törvények, ám van egy érdekes okoskodás arra vonatkozóan, milyen típusú törvények is lehetnének ezek. Úgy látszik, hogy a múltunkban fellelhető ősrobbanás-szingularitás nem teljesen kaotikus, hanem viszonylag rendezett volt. Ám ha a világegyetem egy napon egy „nagy összeroppanás"-szingularitásban újra összeomlik, ez a szingularitás elkerülhetetlenül sokkal kaotikusabb lesz. A szabálytalanságok a gravitációs összenyomás folyamatában felerősödnek. A dolgok sokféleképp válhatnak kaotikussá, ám csak egyféleképp maradhatnak rendezettek. Ezzel kapcsolatban idézzük fel a termodinamika II. főtételét, amely azt a felismerést foglalja törvénybe, hogy a fizikai folyamatokban nő a rendezetlenség (az „entrópia"). Felmerült, hogy a szingularitások és a világegyetem egésze entrópiájának létezhet egy mértéke, és hogy ez az entrópia szintén a termodinamika II. főtételének van alávetve. Ha ez igaz, akkor számos következménnyel jár. Azt várnánk, hogy a kezdeti ősrobbanás-szingularitás rendezett állapot volt, és kisugárzásai nem véletlenszerűek. Ahogy a világegyetem tágult, úgy tudott az anyag szabálytalan struktúrákba, mint például galaxisokba tömörülni a gravitációs entrópia növekedésének megnyilvánulásaként. A végső, kaotikus „nagy összeroppanás" szingularitása a kozmikus rendezetlenség e növekedésének végső eredménye volna. Bármilyen tetszetős ez a történet, nem sokat tesz hozzá a kiindulási tényekhez. Azért tekintik egyáltalán lehetőségnek, mert az általa javasoltnak megfelelő „gravitációs" entrópia valóban létezik az eseményhorizonttal rendelkező fekete lyukakéhoz hasonló, változatlan gravitációs erőterekben.

Stephen Hawking 1974-ben kimutatta, hogy a fekete lyuk termodinamikai értelemben fekete test. Az egyensúlyi termodinamika törvényeinek engedelmeskedik. Gravitációs erőtere és felülete által meghatározott hőmérséklettel és

entrópiával rendelkezik. Már 1974 előtt is ismert volt, hogy a fekete lyukak eseményhorizontjának bármilyen folyamatban részt vevő teljes területe nem csökkenhet, és formai hasonlóság mutatkozott a fekete lyuk felszíne, valamint a termodinamikában az entrópia követte törvényszerűségek között. Hawking kimutatta, hogy a kvantummechanikának a fekete lyukakra gyakorolt hatását tekintve ez az analógia valósággá válik. A kvantum fekete lyukak sugározta részecskék hőmérsékletét és entrópiáját valóban a gravitáció és az eseményhorizont területe határozza meg, és véges idő elteltével ez a sugárzás a fekete lyuk teljes elpárolgásához vezethet. Ennek az elpárolgási folyamatnak a végeredménye még nem világos. Bizony csupasz szingularitás is lehet. Ha így van, ez azt mutatná, hogy ha a gravitáció viselkedésének leírásába a kvantumelméletet is bevonjuk, a „kozmikus cenzúra" nem igaz. Másrészt az elpárolgás végeredménye valamilyen új típusú tárgy is lehet – egy superstring vagy egy tehetetlen elemi részecske. Ha az elpárolgás tömeggel rendelkező maradványt hagy, bármilyen kicsiny is az, akkor nem jön létre szingularitás.

Lehet, hogy a fekete lyukak e fölöttébb szokatlan tulajdonságai igazak. Azt mondjuk, „lehet", mert nem tudjuk, hogy egy új, kvantumgravitációs erő nem akadályozza-e meg, hogy szingularitások egyáltalán létrejöjjenek. Ez a mai fizika más területein már látott irányzatra tereli a figyelmet: annak fontosságára, hogy megkülönböztessük a jelenségeket a *megfigyelhető* jelenségektől.

A gravitáció határt szab annak, hogy milyen tudást szerezhetnek a megfigyelők a természetről, és e korlátozások a megfigyelők tartózkodási helyétől függenek. A fekete lyukak eseményhorizontja a világegyetemet kauzálisan különálló körzetekre osztja. A külső megfigyelő a fekete lyuk eseményhorizontján belül történő eseményekről tett előrejelzéseit nem tudja ellenőrizni. Vajon mindez azt jelenti-e, hogy a fekete lyuk belseje nem lehet „tudományos" kutatás tárgya a kívül lévők számára? Ha igen, akkor mi lehet az eseményhorizonton belül lévő megfigyelők véleménye a külső világról, ahonnan bejutottak? Hogyan viszonyulna a belső megfigyelő az idealisták állításához, mely szerint az eseményhorizont fogalma merő agyszülemény, vagy az instrumentalisták érvéhez, mely szerint az eszköz csupán a világ megértéséhez? Ezek a kérdések kétszerte gyanakvóbbá teszik az embert a tudományfilozófusoknak a tudomány vagy a tudományos módszer „meghatározására" tett kísérletei iránt. Minden ilyen definíciót alkotónak tisztában kell lennie a természet és a világegyetemben található tárgyak bonyolultságának mértékével és mélységével. A cáfoláshoz, igazoláshoz és operacionalizmushoz hasonló fogalmak olyanok, mint a természet kezére rosszul illő kesztyűk, bármilyen divatosnak látszanak is az eszményített tudós kezén.

Kutathatunk-e szingularitást?

Minek hagyja el a tisztes kor éjfélkor az ágyát?

Shakespeare
(Ford. Vas István)

Tételezzük fel, érdekesebbé teendő az életet, hogy az Einstein gravitációs elmélete által megjósolt típusú szingularitások valóban léteznek a természetben. A fekete lyukak középpontjában keletkezhetnek, eseményhorizont mögé rejtve, amely nem engedi, hogy a külvilágot befolyásolják, de akár csupasz formában is létezhetnek. Az első esetben csak akkor volnának ránk hatással a szingularitás anarchikus hajlamai, ha már magunk is az eseményhorizonton belül lennénk. A második esetben elvileg megfigyelhetnénk és megörökíthetnénk azt, ami a szingularitásból kijön, és mégis eltávozhatnánk, hogy beszámoljunk erről a Földön. De mi van, ha el akarnánk érni magát a szingularitást, vagy legalábbis szondát küldenénk egészen a szingularitásba – lehetséges volna ez? Ha, amiként feltehető, a szingularitást egyre növekvő anyag- és energiasűrűség kíséri, akkor kínos helyzetben találjuk magunkat. Minden szondának valamilyen anyagból kell készülnie, és véges méretűnek kell lennie. Ahogy közeledik a magas sűrűségű szingularitáshoz, egyre növekvő árapálykeltő feszültségnek lesz kitéve, és végül szerteszét szakad; először darabokra, majd atomokra, kvarkokra és így tovább. Bizonyos értelemben a szingularitás nem tűri a közelről való fürkészést. A közelében ható hatalmas erők biztonsági rendszerként működnek, hogy megőrizhesse legbelső titkait. Minél részletesebb és pontosabb infomációt próbálunk nyerni a szingularitásról, annál érzékenyebb és bonyolultabb szondát kell beleküldenünk, és annál nehezebb lesz azt működőképes állapotban a szingularitás közelébe juttatnunk. Ha a szingularitás nagyon nagy sűrűségű környezet, a természetnek még egy másik, az információszerzést sokkal inkább megnehezítő, általános jellemzője is utunkba áll. A szondánk által számunkra visszasugárzott fényjelnek ki kell szabadulnia a szingularitás környezetében levő anyag gravitációs vonzásából. Ha csupasz szingularitásról van szó, ez lehetséges, de ára van. A fényjeleknek energiát kell használniuk, hogy legyőzzék a gravitációs erőteret, éppen úgy, mint nekem vagy önnek, ha hegynek felfelé akarunk sétálni. Ezt az energiaveszteséget „gravitációs vöröseltolódásnak" nevezik, és különösen érzékeny mérőműszerrel megfigyelhető, amikor fénysugarak haladnak a Föld gravitációs mezejében. A gravitációs vöröseltolódás azt jelenti, hogy a jelzés meggyengül, és információtartalma lecsökken, mire a szingularitástól távol elér hozzánk. A világegyetem kezdeténél lévő szingularitással is hasonló a helyzet, amint arra

William McCrea rámutatott. Minél közelebb van információforrásunk a világegyetem kezdetéhez, annál hiányosabb az információ, mire itt és most elér hozzánk. McCrea arra gondolt, hogy alapvető korlátozás lehet érvényben azt illetően, mennyit tudhatunk az egykoron a távoli múltban történt dolgokról a fényjelek (vagy bármilyen típusú jelek) formájában érkező információ degradálódása miatt. Ez a korlátozás a csupasz szingularitásra irányuló vizsgálódásunkat is érintené.

Szaggatott idő

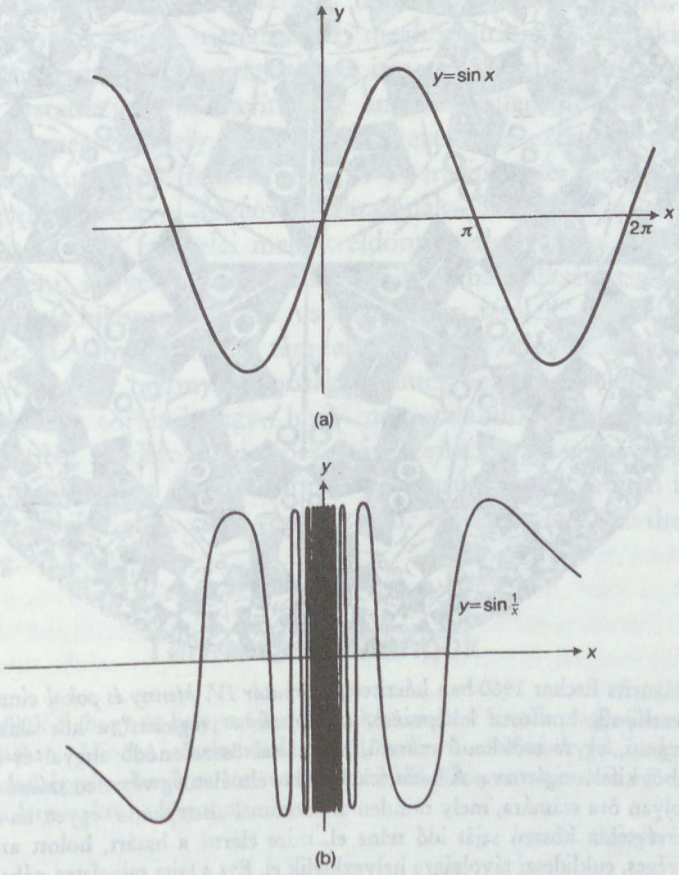
Mindennek rendelt ideje van...

Préd 3,1

Még egy kérdést kell feltennünk a nagy sűrűségű szingularitás megközelítésével kapcsolatban: Mennyi időbe telik odaérni? Az ősrobbanás szingularitása esetében ez felér azzal a kérdéssel: Milyen idős a világegyetem? A hagyományos válasz megadná a gravitációs erőtérben szabadeséssel a szingularitásba zuhanó órán mért időt, ha az óra egész történetét végigkövetjük. Ez a *saját időt* méri, amelyet a speciális relativitáselmélet tárgyalásakor megvitattunk. De miért vonatkozna ez a világegyetem egészére? A világegyetemet nem a speciális, hanem az általános relativitáselmélet irányítja. Honnan tudhatjuk, hogy a világegyetemmel mint egésszel nem kapcsolatos-e valamilyen más, még alapvetőbb időmérték?

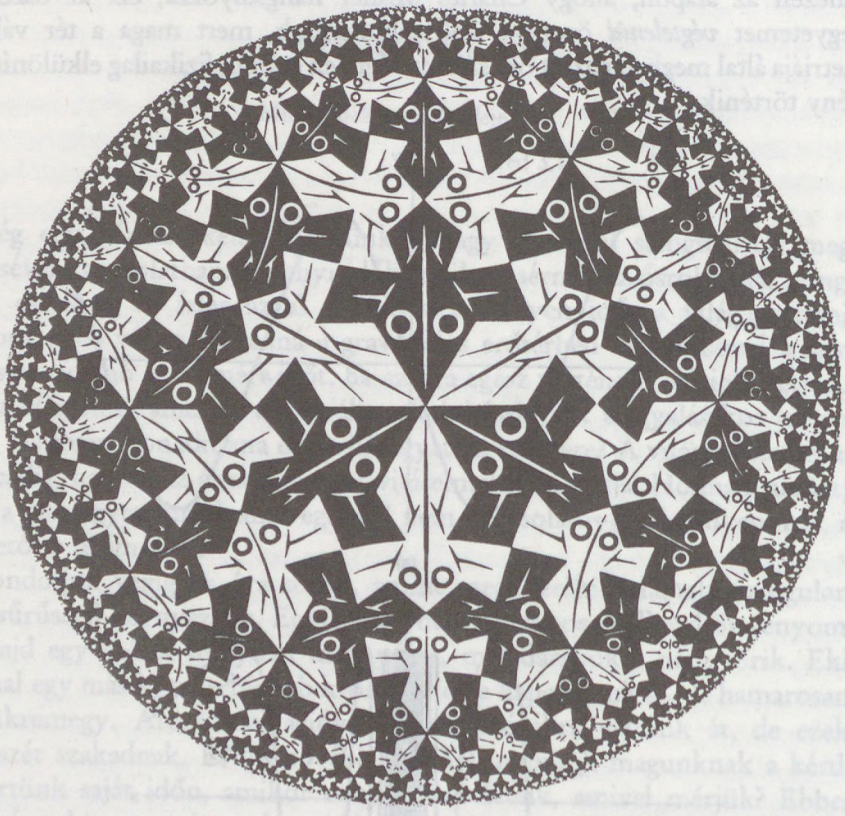
Gondoljuk végig az óra sorsát, amint megközelíti valamely szingularitás nagy sűrűségű környezetét. Egyik irányban fokozatosan elkezd összenyomódni, majd egy másik irányban megnyúlni, míg darabokra nem törik. Ekkor azonnal egy másik, teherbíróbb kronométerre kapcsolunk át, de hamarosan az is tönkremegy. Atomoszcillációval működő órákra váltunk át, de ezek is szerteszét szakadnak. És így tovább. Fel kell tennünk magunknak a kérdést: Mit értünk saját időn, amikor nem marad óránk, amivel mérjük? Ebben a szélsőséges környezetben olyan időmérési módszer után kell néznünk, amely az egyetlen megmaradó dologhoz: a téridő szövetének görbületéhez kapcsolódik. Kiderült, hogy Einstein egyenletei megjósolják: egyes szingularitások igen jellegzetes viselkedésre késztetik a körülöttük lévő teret és időt, ami egyfajta természetes óraként működik. A szingularitáshoz közeledve az anyag mind nagyobb és nagyobb sűrűségűre való összenyomásának hullámzó jellege van, ami a szingularitáshoz közeledve egyre gyorsabban és gyorsabban vibrál. Jóllehet véges hosszúságú saját idő múlik el, mielőtt a hipotetikus óra a

szingularitásba ütközik, a saját időnek ez alatt a véges hosszúságú tartama alatt azonban a térnek *végtelen* számú ilyen oszcillációja játszódik le. „Oszcillációs időben" mérve a világegyetem végtelenül öregnek látszana. Ez nem a Zénón-paradoxonhoz hasonló trükk, mert végtelen számú különálló fizikai esemény történik, mielőtt az óra eléri a szingularitást. Zénón érvét, hogy tudniillik örökké tart keresztülmenni a szobán, mert ehhez a teljes távolság végtelen számú részén kell áthaladni, elvetjük, mert ezek a térközök fizikailag nem léteznek. Ugyanezen az alapon, ahogy Charles Misner hangsúlyozza, ezt az oszcilláló világegyetemet *végtelenül* öregnek kell tekintenünk, mert maga a tér változó geometriája által meghatározott óra szerint végtelen számú, fizikailag elkülöníthető esemény történik.



6.2 ábra. *a)* Az $y=\sin(x)$ függvény grafikus ábrázolása. *b)* Az $y=\sin(1/x)$ függvény grafikus ábrázolása: a görbe az origó $x=0$-nál való megközelítésekor végtelen számú oszcilláción megy keresztül

Ha véges idő alatt végtelen számú dolog megtörténte különösnek látszik, vegyük szemügyre a 6.2 ábrán bemutatott egyszerűbb példát, ahol az $y=\sin(x)$ és $y=\sin(1/x)$ függvények görbéje látható sokféle x értéknél. Ahogy x 0-hoz közelít, a $\sin(1/x)$ görbe egyre több és több oszcilláción megy keresztül. Ha kiindulási pontunkat az x tengelyen a 0-hoz közel választjuk meg, végtelen számú oszcillációnak kell megtörténnie, mielőtt eljutunk az $x=0$ ponthoz.



6.3 ábra. Maurits Escher 1960-ban készített, *Körhatár IV. Menny és pokol* című fametszete. Ez a Lobacsevszkij-sík konform leképezése, amelyben a „végtelen" a kör alakú határnál van. Végtelen számú, egyre csökkenő méretű, egymással összefonódó angyal és ördög tölti ki, a középpontból kifelé sugározva. A határ felé haladva elméletileg végtelen számú motívum jelenik meg. Egy olyan óra számára, mely minden alkalommal „kettyenne" egyet, ha egy motívummal találkozik, végtelen hosszú saját idő telne el, mire elérné a határt, holott az a középponttól mégiscsak véges, euklideszi távolságra helyezkedik el. Ezt a fajta rajzolatot néha Poincaré-síknak is nevezik Henri Poincaré után, aki azt is felvetette, hogy ez talán egy véges, ám gyakorlatilag elérhetetlen határú világegyetem képe

Ha tehát olyan lények (vagy számítógépek) lennénk, akiknek szubjektív órája emez oszcillációkéval azonos sebességgel „ketyeg", azt tapasztalnánk, hogy örökké „élünk". Soha nem érnénk el a szingularitást, ahol a természeti törvények nem léteznek: a szingularitás „az üveghegyeken túl" maradna. A kozmológia egyik lényeges, megoldatlan kérdése, hogy létezik-e valamilyen egyedüli, abszolút időmérték, amelyet az egész világegyetemben annak belső geometriája határoz meg. Amíg erre választ nem kapunk, igazából nem tudhatjuk, milyen fizikai jelentést kapcsoljunk a téridő-szingularitásokhoz, és nem dönthetjük el, hogy a világegyetem véges vagy végtelen korú (lásd a 6.3 ábrán bemutatott példát is).

Felismerhetjük, hogy az idő definíciójának megközelítése operacionalista jellegű. Az időt a mérés folyamata által meghatározottnak tekinti, és közeli rokona a konstruktivista matematikai megközelítésnek. Hawkingnak és Penrose-nak mind itt, mind a 4. fejezetben ismertetett szingularitástételei nem konstruktív matematikai bizonyítékok, amelyek ellentmondások felfedése révén állapítják meg valamely szingularitás létezését, és ezért sem a konstruktivista matematikus, sem (feltehetően) az operacionalista fizikus, mint pl. Bridgman nem fogadna el érvényes igazságnak. Számukra a szingularitás létének kérdése a tétel feltételei mellett eldönthetetlen volna (érdekes volna viszont kideríteni, milyen további feltételekre volna szükség a szingularitástételek konstruktív bizonyításához). A szingularitás-„tételek" ilyetén szemlélete összeegyeztethető volna az imént tárgyalt szaggatott idővel. A világegyetem modelljeinek csak egy bizonyos típusában, amelyben a végtelen számú oszcilláció lejátszódik, történik úgy, hogy nem találunk szingularitást véges számú, műveletileg kidolgozható lépés után. Lehet, hogy más világegyetemmodellekben az időnek ez az operacionalista típusú definíciója nem létezik, és a szingularitás elérése előtt csak véges számú, fizikailag véghezvihető dolog történhet meg.

Természeti állandók

> Képzeljük el, hogy 60 helyett 60 milliárd kémiai elem létezik... egyenletes eloszlásban. Minden alkalommal, ha új kavicsot emelnénk fel, nagy valószínűséggel valamilyen ismeretlen anyagból állna; semmit nem érne, amit a kavicsokról addig tudtunk.
>
> H. Poincaré

A természet működését leírni szándékozó matematikai egyenleteinkben megjelennek bizonyos mennyiségek, amelyeknek különleges szerepet tulaj-

donítunk, és „természeti állandónak" neveztük el őket. Természetes módon tűnnek fel egyenleteinkben, mint változó fizikai mennyiségek közti arányossági tényezők. Mint ilyenek, csak mérés útján határozhatók meg. Bár a fizikai változók viszonyának formáját valamilyen szimmetriaelv vagy invariancia írja elő, az elv csak annyit mond, hogy például az energia arányos a tömeggel. Az arányossági tényező értékét nem tudja megadni. Az elsőnek felfedezett ilyen mennyiség Newton gravitációs állandója volt. Abból a következtetésből származott, hogy bármilyen két tömeg közti gravitációs erő arányos a tömegek szorzatával, és fordítottan arányos távolságuk négyzetével. Ez az arányossági tényező a newtoni gravitációs állandó. Bár egy efféle paraméter létezése Newton rendszerében és hasonlóképpen Einstein azt felváltó elméletében is elkerülhetetlen, számszerű értékét az elmélet nem határozhatja meg. Csak a gravitációs erő tényleges mértékének megfigyelésével győződhetünk meg róla.

Végső soron félrevezetőnek bizonyulhat az a tény, hogy ezek az állandók természeti jelenségeket leíró egyenletekben arányossági tényezőként bukkannak fel. Lehet, hogy sajátos leírási módszerünk művi termékei. Ez a lehetséges részrehajlás mégis olcsó ár a világ leírásának olyan módjáért, mely alkalmas módon, önmagától elválasztja az ismeretlen részeket azoktól, amelyeket szimmetriameggondolások határozhatnak meg.

Egy fizikai egyenletben szereplő arányossági tényező csak akkor nyeri el a „természeti állandó" megjelölést, ha *egyetemesen* igaznak vélt természeti törvényben jelenik meg. Így Newton azt hitte, hogy gravitációs törvénye mindenre érvényes, akár a Földön van az, akár az égen, és így a benne foglalt gravitációs állandó méltán tart igényt az egyetemes természeti állandó címére. Az ön kerékpárgumijának rugalmassága szintén arányossági tényező a nyomás alatt álló gumi nyúlását leíró egyenletben, ám aligha egyetemes állandó, hiszen egy bizonyos gumidarabhoz kapcsolódik, amely valamilyen módon minden más gumidarabtól különbözik. Érdeklődnénk azonban az olyan egyedi tárgyak tulajdonságai iránt, amelyek az egész ismert világegyetemben azonosak: például egyetlen elektron elektromos töltésének értéke iránt, miután minden elektront minden tekintetben azonosnak vélünk.

A fizikai világ megértésében elért valódi haladásban mindig szerepet játszik:

a) új, alapvető természeti állandó felfedezése;
b) olyan képlet, amely megmutatja, hogy egy természeti állandó értékét csak más természeti állandók számértéke határozza meg; vagy
c) annak felfedezése, hogy egy természeti állandónak hitt mennyiség nem állandó.

A kvantumelméletnek Planck, Einstein, Bohr és mások általi bevezetése például a Planck-állandónak nevezett új, alapvető állandót hozta magával, amely a közvetlen megfigyelés kvantumhatárát szabja meg (ennek tárgyalását lásd a 3. fejezetben). Einstein speciális relativitáselmélete egyetemes státust adott a fény vákuumban mért sebességének, és Einstein kimutatta, hogy ez kapcsolja össze a tömeg és az energia fogalmát. A XIX. század vége felé Maxwell munkásságában is, amikor az elektromosság és a mágnesesség elméletét az elektromágnesesség egységes elméletében vonta össze, a fénysebesség alapvető volta jelentette az összekötő kapcsot.

A fizikusok többsége számára szaktárgyuk végső célja nem kevesebb, mint az összes egyetemes állandó számértékének *meghatározása*: annak bizonyítása, hogy csak egyetlen, belső ellentmondásoktól mentes értékkészlet létezik, s hogy a belső ellentmondásmentesség e követelménye minimális számú szimmetriaelvvel együtt elegendő ahhoz, hogy a világ szerkezetét egyértelműen meghatározza. Ez olyan elméletek kidolgozását követeli meg, melyekben az állandók az egyszerű arányossági tényezőnél fontosabb szerephez jutnak. Azt követeljük meg, hogy maguknak az arányosságoknak a léte függjön az arányossági tényező értékétől. Érdekes, hogy milyen gyakran visszhangozták ezt a nézetet különböző tudósok valamelyest meghatározottabb formában.

Einstein a következőképpen vélekedett a természeti állandókról:

> ...szeretnék most egy tételt kimondani, amely egyelőre semmi másra nem alapozható, mint a természet egyszerűségébe, illetve megérthetőségébe vetett hitre: *önkényesen választható* állandók nincsenek; vagyis a természettörvények logikailag annyira erősen meghatározottak, hogy ezekben a törvényekben csak racionálisan teljesen meghatározott állandók szerepelhetnek (tehát olyan állandók nem, amelyek számértéke az elmélet megsemmisítése nélkül megváltoztatható).
>
> (Ford. Nagy Imre)

Vagy pedig íme a Nobel-díjjal kitüntetett részecskefizikus, Steven Weinberg nemrég kifejtett nézetei:

> A kvantummechanika és a relativitás *együttesen* rendkívül korlátozó és ezért hatalmas logikai gépezetet bocsát rendelkezésünkre. Elménkkel akárhány, mindenféle mesebeli részecskékkel és kölcsönhatásokkal benépesített világegyetemet átkutathatunk, ám nagyon kevés kivétellel mind eleve elvethető, mert nincs egyidejűleg összhangban a speciális relativitáselmélettel és a kvantummechanikával. Végül remélhetőleg azt találjuk majd, hogy csak egyetlen elmélet van mindkét fentivel összhangban, és ez az elmélet határozza meg a mi tényleges világegyetemünk természetét.

Mindkét idézett tudós abban szeretne hinni, hogy a világot egyedül az önmagával való ellentmondásmentesség követelménye határozza meg. Ez újkeletű elképzelés, és érdekes felidéznünk Newton ellenkezését azzal az elképzeléssel szemben, mely szerint a természetnek szükségszerű szerkezete van. Samuel Clarke tollával így írt Leibniznek:

> Ebből a kútfőből [Isten szabad akaratából] fakadtak azok a törvények, amelyeket természeti törvényeknek nevezünk, és amelyekben a legbölcsebb tervezésnek számos nyoma található meg, ám a szükségszerűségnek a leghalványabb árnyéka sem. Ezért e törvényeket nem szabad bizonytalan feltevésekben keresnünk, hanem megfigyelésekből és kísérletekből kell megtanulnunk őket. Annak, aki önhittségében azt gondolja, hogy a fizika valódi alapelveit és a természetes dolgok törvényeit egyedül elméje erejével, értelme belső fényével képes megtalálni, vagy azt kell feltételeznie, hogy a világ szükségszerűen létezik, és ugyanez a szükségszerűség érvényes a javasolt törvényre is; vagy ha a természet rendjét Isten akarata állapította meg, azt, hogy ő, a hitvány féreg, meg tudja mondani, hogyan kellett ezt a lehető legjobban csinálni.

Newton nézeteit nem csupán a tudományos gyakorlat célszerűsége befolyásolja, korszakának „voluntarista" teológiáját tükrözik (melyet Occam a XIII. században „nominalizmus" néven foglalt rendszerbe), azt a hitet, hogy a természeti törvények nem szabnak határt az isteni hatalomnak. E törvények csak „nominálisan" érvényesek, ám „csodák" esetén időszakosan hatályon kívül helyezhetők.

Számos új, először megjelenő természeti állandót tartalmazó, alapvető elmélet kialakulása annak a jele, hogy a tudomány mozgalmas serdülőkoron halad át. Az eredmény: sok elmélet, melyek mind sikeresek saját alkalmazási körükön belül, ám részben, sőt teljesen elkülönülnek a többi elmélettől ama jelenségek körét tekintve, amelyekre vonatkoznak. Az általános relativitáselmélet és a kvantumelmélet jó példa erre. Mindkettő ragyogóan sikeres saját körén belül, sikeres előrejelzéseket és kielégítő magyarázatokat ad. E két elmélet azonban jelen formájában nem fér össze egymással: legalább az egyiket, de inkább mindkettőt alapos felülvizsgálatnak kell alávetni ahhoz, hogy össze lehessen házasítani őket. Erre a frigyre szükség van, ha a világegyetem fejlődésének első pillanatairól teljes képet akarunk kapni. Csak az ősrobbanás első pillanataiban elég erősek a gravitációs erők ahhoz, hogy a tér és idő görbületét oly mértékben eltorzítsák, hogy a résztvevő tömeg hullámtermészete fontossá váljék. Csak ebben a rendkívül szokatlan környezetben találkozhatunk szemtől szembe a gravitációnak az elemi részecskék mikroszkopikus világára gyakorolt, összegezett hatásával. Máshol, különösen pedig a világegye-

temnek azokban a részeiben, amelyeket ma megfigyelünk, a gravitációs erők az elektromos és mágneses erőkhöz képest olyan gyengék, hogy a kvantumvilág gyakorlatilag elvált az általános relativitás világától. Mindazonáltal azt várnánk, hogy a kvantumelmélet és az általános relativitáselmélet bármely törvényes egyesítése kapcsolatot mutat ki az elméletekre jellemző természeti állandók között. Ez a kapcsolat lényegében kimutatná, hogy a természet egyik alapvető ereje vagy szerkezeti eleme más hasonló erőkből vagy elemekből származik. A másik lehetőség az, hogy mindkét elméletnek gazdagabbá és különösebbé kell válnia, mielőtt lényegi tartalmuk szintézise megvalósulhat. Emlékszünk rá, mennyire különbözött egymástól a statikus elektromosság és a mágnesesség elmélete, és csak akkor egyesülhettek az elektromágnesesség egyetlen elméletében, amikor dinamikus oldalukat is figyelembe vették. A szuperstringek szokatlan tulajdonságai a legvalószínűbb jelöltekké tették őket a természet különböző alkotóelemeinek egyesítésére és magyarázatára. Már megvitattuk (a 4. fejezetben) a mindent felölelő, mindent megmagyarázó természeti elmélet keresését kísérő reményeket és aggodalmakat. Nagyon is lehetséges – sőt, valószínű –, hogy egy ilyen típusú, sikeres elmélet végül előrejelzi a természeti állandók számértékét, ám így még mindig nem lennének meghatározva a kozmológia kezdeti feltételei, sem pedig a természet ama „majdnem"-szimmetriáinak az értékei, amelyek a világegyetem története során egyes szimmetriák mintegy véletlenszerű megsértése útján jelentek meg.

Súlyok és mértékek

> Olyan ez, mintha számukra a mérés ama mértékéhez, melyet is lábnak nevezünk, egy kancellár lába szolgálna mintául, s kérdem én: minő kétes mérték volna ez? Az egyik kancellárnak nagy, a másiknak kis lába van, a harmadiké pedig szóra sem érdemes.
>
> John Selden (1689)

Ha az alapvető természeti állandók meghatározásának és értelmezésének problémáját kívánjuk felmérni, ki kell emelnünk a mennyiségek egy fontos vonását, melyet a legalapvetőbbnek tartunk. Megszoktuk, hogy a dolgokat különböző súly- és mértékrendszerekben kifejezve mérjük. Sok ilyen rendszer létezik. Egyik sem szent és sérthetetlen. Mindegyik úgy van megtervezve, hogy használata bizonyos valós körülmények között alkalmas legyen. Számosat közülük antropomorf módon az emberi test különböző részeiből származtattak. A legnyilvánvalóbb ilyen egység a „láb". Mások már nem ennyire

ismerősek. A „yard" az ember orra hegyétől oldalra egyenesen kinyújtott karjának legtávolabbi ujjhegyéig kifeszített szalag hossza volt. A „könyök" az ember könyökízületének távolsága kinyújtott kezének legtávolabbi ujjhegyétől, és mai mértékkel kb. 17 és 25 hüvelyk (43 és 63 cm) között változik a különböző ókori kultúrákban, amelyek használták ezt a mértékegységet. A tengerészeti hosszúságegység, az öl, az emberi testről származtatott legnagyobb hosszmérték: egy mindkét karját vízszintesen oldalra kinyújtó ember ujjhegyei közötti távolság.

Az ilyen egységekkel az a legnyilvánvalóbb probléma, hogy minden ember más és más méretű. Melyik ember legyen a szabvány? A király a kézenfekvő jelölt (akinek az ókorban nem is akadt versenytársa), ám még így is minden alkalommal, amikor személycsere történik a trónon, újra kell kalibrálni a mértékegységeket. E problémára érdekes megoldást eszelt ki I. Dávid, Skócia királya a „skót hüvelyk" meghatározására a XII. században: elrendelte, hogy egy nagy, egy közepes termetű és egy kicsiny ember hüvelykujja körme tövének szélességét *átlagolják*.

A centiméter, kilogramm és liter modern metrikus rendszere és a hüvelyk, font és pint hagyományos „birodalmi" rendszere egyaránt jó hossz-, súly- és térfogatmérték. Ezeket eredetileg valamilyen szabványosított tárgy segítségével határozták meg, amelyet a világon egy helyen tartottak, míg más helyeken másolatokat helyeztek el. A kilogramm például egy platina és iridium ötvözetéből készült, különleges henger tömege volt, amelyet a Francia Szabványügyi Hivatal széfjében őriztek Sèvres-ben. A szabványoknak objektív módon, emberi méretektől független definiálását először a franciák vezették be 1799-ben.

Hasonlóképpen a hőmérsékletet is mérhetjük a Celsius- vagy Fahrenheit-skálán. Ezek konvenciók. Természetesen szép volna, ha az alapvető természeti állandókat a használt mértékegység-rendszertől függetlenül is ki tudnánk fejezni. Úgy tehetjük ezt meg, hogy az alapvető mennyiségeket azonos típusú mennyiségek arányaként fejezzük ki. Így a két proton között ható elektromágneses és gravitációs erő aránya tiszta szám, nem függ attól, hogyan választottuk meg az erőnek vagy a tömegnek, vagy ami azt illeti, bármi másnak a mértékegységét. Az eredmény majdnem

$$10^{39}.$$

Vegyünk egy másik példát: a proton tömegének az elektron tömegéhez viszonyított aránya is pusztán egy szám. Értéke durván

1836.

Két, egymástól kvantumhullámuk hullámhosszának megfelelő távolságra lévő elektron közti elektromágneses erő szintén felírható egy mértékegység nélküli számmal; az eredmény megközelítőleg ez a törtszám:

1/137.

És így tovább. Minden felszínes és másodlagos bonyolultságától megfosztva, a fizikai világ lényeges vonásainak legalapvetőbb leírása ilyen mértékegység nélküli számok katalógusára redukálódik. Ezen alkotórészek segítségével alakíthatjuk matematikai egyenleteinket és invarianciaelveinket *saját* világunk működő leírásává, valamilyen más, hipotetikus világé helyett. Ha minden fizikai elméletünk minden kikövetkeztetett elve tökéletesen helyes volna, ezeket a számokat akkor is meg kellene mérnünk, hogy amazokat használni tudjuk. Lehet, hogy elméleteink általános szerkezete antropomorf, és annak a ténynek, hogy természeti állandók származnak belőlük, lehetnek antropomorf vetületei, ám ezeknek az állandóknak az értéke semmiképpen sem lehet az.

Változó állandók?

> Isten változtathatja a természeti törvényeket, és a világegyetem különböző részeiben különböző világokat teremthet.
>
> Isaac Newton

A fejezet elején óva intettünk attól, nehogy túlságosan meggondolatlanul folyamodjunk a változó természeti törvények eszméjéhez. A gyakorló tudós, ha ilyen fogalomról beszél, kivétel nélkül valami jobban meghatározott dologra gondol. Megkérdőjelezi a szabványos dogmát, mely szerint az előző részben tárgyaltakhoz hasonló, pusztán számokkal kifejezett mennyiségek értéke valóban mindenhol és mindenkor ugyanaz. Ha egy természeti állandó nem pusztán egy szám, hanem valamilyen mértékegység kapcsolódik hozzá – mondjuk, méter, láb vagy hüvelyk –, akkor annak a gondolatnak, hogy ez az állandó térben és időben változhat, nincs értelme, hiszen a mérésére használt egységrendszer megváltoztatásával elérhetjük ennek látszatát. Az a mennyiség azonban, amely pusztán egy szám, érzéketlen az alkotórészei értékelésére használt mértékegység-rendszer iránt, és értékének változása valódi, megfigyelhető jelentéssel bírna. A természeti törvények állandóságába vetett hitünk sarokköve az a tény, hogy e számszerű természeti állandók értéke pontosan ugyanaz, bárhová is tekintünk a világegyetemben. Ezenkívül az űrben haladó

fényjelek véges sebessége miatt a nagyon távoli tárgyak megfigyelése egyúttal a távoli múltban történt események megfigyelése is. Az a fény, amely távoli kvazárokból *most* jut el hozzánk, a távoli múltban indult útjára. A messzi csillagászati objektumokról érkező fény spektrumában ezért a természeti állandók több mint tizenkét milliárd évvel ezelőtti, sokkal az ember megjelenése előtti értékének következményeit figyeljük meg.

A természeti állandók állandóságának van egy kirívó földi példája, amelyre 1976-ban derült fény. Az afrikai Gabon állam egyik urániumbányájában a szamáriumnak, ennek a ritka elemnek kétféle izotópja található nagy mennyiségben (az izotópok ugyanannak az elemnek különböző változatai, amelyekben az atommag azonos számú protont, de különböző számú neutront tartalmaz). A közönséges szamáriumban e kétféle szamárium aránya körülbelül 9:10, az oklói bányából vett mintákban azonban ettől igen nagy mértékben eltérő, kb. 1:50. Ennek az az oka, hogy a bányában uralkodó körülmények összejátszása folytán évmilliárdok alatt természetes atomreaktor jött létre, amely egyik izotópot a másikká alakította. Az egyik szamáriumizotópnak a másikba való átalakulásához azonban a véletlen egybeesések egészen különleges együttesének kell megvalósulnia, ami a természet elektromágneses, radioaktív és nukleáris erőinek relatív erősségétől függ. Az a tény, hogy a reaktor kétmilliárd évvel ezelőtt kritikus állapotba került, azt jelenti, hogy azoknak az alapvető természeti állandóknak, amelyek összekapcsolódásából a különleges nukleáris reakciók létrejöttéhez szükséges egybeesés megszületik, akkor éppen úgy létezniük kellett, mint most. Ez bámulatosan szűk keretek közé szorítja ama mértékegység nélküli számok értékének ingadozását, amelyek az alapvető elektromágneses, gyenge és nukleáris erők, illetve kölcsönhatások erősségét jellemzik. A megfigyelhető világegyetem tizenötmilliárd éves élete folyamán ezek az állandók nem változhattak többet, mint rendre egymilliomod, egyötvened, illetve egy-ötvenmilliomod részt. A gyenge kölcsönhatás, amint neve is mutatja, a másik két természeti erőhöz képest annyira kis hatású, hogy egészen jelentős mértékben ingadozhatna anélkül, hogy a másik két erő viszonylag kis változásainál már fellépő kedvezőtlen következmények jelentkeznének.

A csillagászati megfigyelések alkalmasak arra, hogy erőteljesen korlátozzák az elfogadott természeti állandók bármilyen térbeli vagy időbeli változását. Ne feledjük: a csillagok, galaxisok és kvazárok tőlünk való óriási távolsága azt jelenti, hogy a ma onnan ideérkező fény hosszú idővel ezelőtt indult el, ezért a világegyetem távoli részeit most olyannak látjuk, amilyen sok millió, sőt galaxisok és kvazárok esetében több milliárd évvel ezelőtt volt. Így a távoli csillagból érkező sugárzás fizikai tulajdonságait össze lehet hasonlítani a Földön

itt és most megfigyelhető sugárzásokéval, és ellenőrizni lehet, hogy van-e közöttük különbség. Ilyen vizsgálatok alapján levonható az a következtetés, hogy a természeti állandók értékének változása – ha egyáltalán van ilyen – a világegyetem tágulása történetének tizenötmilliárd éve alatt kisebb, mint egy századrész.

Az ingadozások kérdése az űrben fogalmi szempontból több nehézséget okoz. Newton gravitációs állandójának – vagy annak más, dimenzióval bíró természeti állandókkal alkotott, dimenzió nélküli kombinációjának – ingadozása látszólag azt feltételezi, hogy a világegyetemben léteznek „kitüntetett" helyek, ahol egy bizonyos állandó maximumot vagy minimumot ér el. A filozófiai ellenvetésektől eltekintve azonban egy olyan világegyetem, ahol a természeti állandók a hely függvényében változnak, igencsak érdekes hely lenne. Tételezzük fel, hogy csak a természet összes elektromágneses kölcsönhatását szabályozó „finomszerkezeti állandó" – $\alpha = 2\pi e^2/hc$ (e az elektron elektromos töltése, h a Planck-állandó és c a fénysebesség vákuumban) – értéke csökken, ahogy valamelyik tényleges helyről kifelé haladunk az űrben.

Az elektromágnesesség erejének ez a változása mind a kémiai, mind a fizikai folyamatokra hatással lenne. Ebben az elképzelt világban a világegyetem közepétől bizonyos távolságban létezne egy „élet-övezet", ahol α értéke közel áll 1/137-hez, és ahol ezért atomok létezhetnek. Azokon a helyeken, ahol α ennél nagyobb, nem léteznének atomok, mert az elektronok az atommagba zuhannának. Ott, ahol α értéke kisebb, az atomokat összetartó erő túlságosan gyenge lenne ahhoz, hogy fennmaradjanak. A magunkhoz hasonló megfigyelők csak az élet-övezetben jelenhetnének meg. Ha a finomszerkezeti állandó egyenletes csökkenése helyett a távolsággal szinuszosan oszcilláló ingadozást feltételeznénk, akkor sok (ha a világegyetem a térben a végtelenségig terjedne, végtelen sok) élet-övezet létezne. A fizikában némileg járatos olvasó szórakoztató estét tölthet annak felvázolásával, milyen is volna egy ilyen világegyetem az egyik „élet-övezet" egyik lakója számára.

Hagyományos természeti állandóink térben vagy időben való ingadozására nincs megfigyelésen alapuló bizonyíték, létezik azonban egy furcsa, tisztázatlan egybeesés, ami azt mutathatja, hogy a természeti állandók értéke statisztikai úton meghatározott, és térben és időben a világegyetemnek mint egésznek a fejlődésével összeforrott módon változik. Régóta ismert, hogy a két proton között ható gravitációs erőt jellemző, dimenzió nélküli szám értéke körülbelül 10^{-39}. Ez magában véve is érdekes, ám az embernek feltűnik az a „véletlen egybeesés", hogy ez a szám durván azonos a látható világegyetemben ma található összes proton száma (kb. 10^{78}) négyzetgyökének reciprokával, és ez az érték, tudniillik a négyzetgyök reciproka egyenlő a véletlen tárgyakból álló

halmazban várható statisztikus fluktuációval. Ez arra utal, hogy a gravitációs állandó valamilyen módon a látható világegyetemben található atomok számának statisztikai megnyilvánulása. Mindez természetesen merő spekuláció (a statisztikus kapcsolat csak akkor adódik, ha a világegyetemben a *protonok* között ható gravitációs erőt hasonlítjuk össze ezek számával; ha az érvelésben más, lehetséges módon alapvetőbb fontosságú elemi részecskéket használunk, az egybeesés a négyzetgyök reciprokával nem jön létre). A természetben előforduló számszerű egybeesésről, amelyen a statisztikai egybeesés alapul, a következő fejezetben még lesz mondanivalónk.

Új dimenziókra nyíló ablak?

„Szűzanyám! – kiáltott föl Mrs. Snip –, van olyan hely, ahol az emberek arra merészkednek, hogy a föld fölött éljenek?" „Mindaddig én sem hallottam arról, hogy a föld *alatt* is élnek emberek – válaszolta Tim –, amíg csak ide nem látogattam Óriásországba." „Idelátogatott Óriásországba? – sikította Mrs. Snip –, miért, nem mindenütt Óriásország van?"

R. Quizz

Sok éven át nem kapcsolódott szorosan a fizika fő áramlatához az a gondolat, hogy a természeti állandók az idő múlásával vagy egyik helyről a másikra lassan változhatnak. Minden alapot nélkülöző okoskodás volt csupán, amely teljesen rögtönzött gondolatokra támaszkodott azt illetően, hogyan történnek ezek az ingadozások. A legutóbbi években azonban kiderült, hogyan várhatók megfigyelhető ingadozások.

Hangsúlyoztuk, hogy ha léteznek egyáltalán természeti törvények, léteznüük kell változatlan állandóknak is – egy *invariancia* megnyilvánulásaként. Ezek az állandók a tér három dimenziójának változatlan jellemzőit foglalják törvénybe. Ám mi van akkor, ha a térnek több dimenziója van annál a háromnál, ami számunkra ismerős? Tegyük fel, hogy négydimenziós. Az új dimenzió észrevehetetlenül kicsi lehetne, nyilvánvaló hatása nem volna, csak az elemi részecskék világában. Ha így volna, olyanok lennénk, mint egy labda felszínén mászkáló hangyák, amelyeknek nincs tudatos tapasztalatuk a felszín fölött létező tér extra dimenziójáról. A valódi törvények és változatlan állandóik a négydimenziós térben léteznének, és ahhoz a háromdimenziós szeletéhez, amelyet mi tapasztalunk, nem feltétlenül kapcsolódnak változatlan állandók. Ha az elektromágneses természeti erő erőssége a négydimenziós világban állandó, akkor a háromdimenziós világban a negyedik dimenzió

mértékének arányában változik. Ha az extra dimenzió nő, azt kellene látnunk, hogy a mi természeti erőink gyengülnek. Ha az extra dimenziók mérete zsugorodik, a mi alapvető erőinknek erősebbé kell válniuk. Feltételezhetjük, hogy a világegyetemnek további térbeli dimenziói vannak, és kiszámíthatjuk, hogy emez extra dimenziók mértékében bekövetkező bármilyen változás hogyan nyilvánul meg a mi háromdimenziós természeti „állandóink" változásaiban. Az elektron töltésének például a tér bármilyen extra dimenziójának átlagos sugarával fordított arányban kellene csökkennie. Ezek az előrejelzések lehetővé teszik, hogy a természeti állandók állandóságát tanúsító pontos megfigyeléseket közvetlen bizonyítékként értelmezzük arra, hogy a tér extra dimenziói (ha vannak ilyenek) időben nem változnak. Ha az extra dimenziók „világegyeteme" a mi világegytemünkhöz hasonlóan tágulóban van, vagy még ha összehúzódóban van is, akkor ezt körülbelül egymilliárdszor lassabban teszi, mint az általunk megfigyelt háromdimenziós világegyetem. Az esetleges további dimenziók e statikus jellegére utaló bizonyíték jó összhangban van a részecskefizikusok várakozásaival. Emlékszünk: ők úgy vélik, hogy bármilyen extra dimenziónak mikroszkopikus skálájúnak kell lennie, és nem lehet az általunk lakott három dimenzió példájára makroszkopikusan táguló állapotban.

E fejlemény tanulsága ez: lehet, hogy egy nagyobb világegyetem keresztben vágott, kis szeletében élünk. Ha így van, akkor a valódi természeti törvényeket és a leglenyűgözőbb szimmetriákat talán majd csak akkor leljük meg, amikor az egész világegyetemet áttekintjük, nemcsak egy kis szeletét. Némileg meglepő módon azonban úgy találtuk, hogy az extra térbeli dimenzióknak megfigyelhető következményei lehetnek a mi megfigyelhető, háromdimenziós világegyetemünkben. Miután látóhatárunk így kiszélesedett abban a tekintetben, hogy mi határozza meg a körülöttünk lévő természet törvényeinek és állandóinak alakját, okosan tennénk, ha a fizika oly sikeresen alkalmazott alapvető törvényeit ideiglenesnek tekintenénk. És ha ily kevéssé értjük a szimmetria és az egyöntetűség eredetét, illő, hogy ne nyilatkozzunk túl határozottan tartósságuk valódi mértékéről, és eszünkbe idézzük Sydney Smith mondását: „Ha valakit megingathatatlan törvényről hallok beszélni, mindjárt tudom, hogy megingathatatlanul ostoba."

7

Kiválasztási hatások

Prokrusztész, emlékezzünk csak, beleerőltette vendégeit – kit megnyújtva, kit megcsonkítva – a maga készítette ágyba. De talán nem hallották még a történet végét. Megvirradván, mielőtt elmentek volna, megmérte őket, majd „Az utazók alakjának egyformaságáról" címmel tudós dolgozatot írt az Attikai Antropológiai Társaság számára.

A. S. Eddington

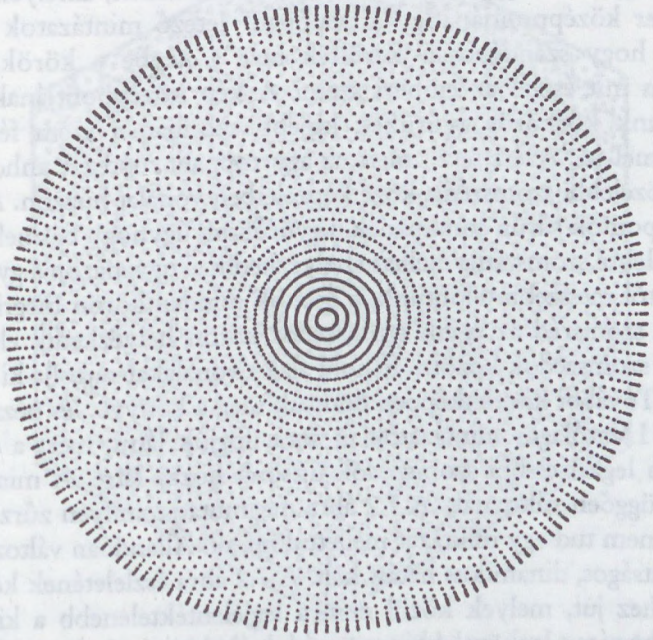
Mintázatok

Jól jegyezze meg minden természetbúvár ezt a szabályt: szemlélje gyanakvással mindazt, amit elméje különleges megelégedéssel fogad.

Francis Bacon

Egy hirdetésre a londoni földalattiban még gyermekkoromból emlékszem. Arról tájékoztat, hogy ha a szemlélő meg tudja adni néhány számsor következő tagját, vagy ha ki tudja választani egy halom látszólag hasonló forma közül az oda nem illőt, jól fizető állást kaphat annál a csodálatos cégnél, amelynek telefonszáma a hirdetés alján található stb. Az ilyen hirdetések jól szemléltetik, hogy társadalmunk milyen könnyedén egyenlőségjelet tesz az általában matematikai vagy geometriai természetű mintázatok vagy viszonyok felismerésének képessége és az „intelligencia" közé. A legtöbb intelligenciateszt rendkívül nyomatékosan hangsúlyozza ezeket az észbeli képességeket. A tesztet összeállítók számára általában lényegtelen, hogy ezek mérnek-e valami olyat, ami „intelligenciaként" definiálható. Elsődlegesen a mintázatok felismerésének és elkülönítésének sajátos képessége érdekli őket. Az intelligencia ebben az értelemben úgy határozható meg, mint az, amit az intelligenciatesztek mérnek. Az emberi faj persze valószínűleg sokat köszönhet ama képességének, hogy képes felismerni a mintázatok körvonalait. Lehet, hogy az evolúció kissé túlságosan is szakértővé tett minket felismerésükben. Hajlandóságunkat mintázatok látására ott, ahol nincsenek is, jól szemlélteti az a lelkesedés, amellyel az ókor embere ekét és vadászt, rákot és mérleget ismert

fel a csillagképeknek nevezett csillagmintázatokban, vagy amellyel a modern ember csatornákat ismer fel a Marson. Ám még mindig jobb mintázatokat látni ott, ahol nincsenek, mint képtelennek lenni mintázatokat felismerni ott, ahol valóban vannak. Ha állandóan azt ismételgeti családjának, hogy tigrist lát a fák között, amikor nincs is ott tigris, legfeljebb kissé paranoidnak tartják, ám ha nem látja meg a valóban ott rejtőzködő tigrist, akkor ön halott! A túlérzékeny mintázatfelismerő képesség hajlamosít a túlélésre.



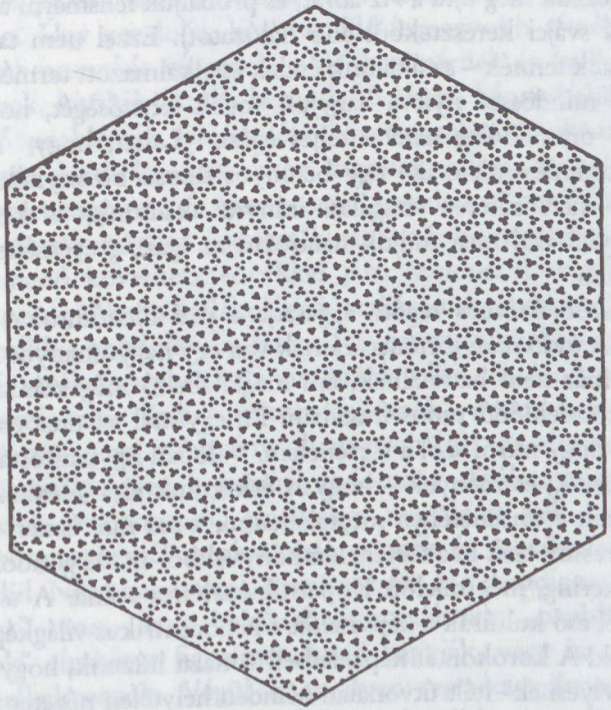
7.1 ábra. Ez a mintázat egymástól egyforma távolságra lévő, pontokból álló koncentrikus körökből áll. Minden körben azonos számú pont van, és minden második körben a pontok sugárirányban rendeződnek el. A körök és egyenes vonalak e beépített mintázatai ellenére a szem három fő mintázatot észlel: a középpont közelében koncentrikus köröket, a középponttól távolodva félhold alakú „szirmokat", a kerület mentén pedig sugárirányú, egyenes vonalakat. E benyomások a szem ama hajlamából fakadnak, hogy a legközelebbi szomszédok között képzeletbeli vonalakat húzzon. Az ábra középpontja közelében bármely pont legközelebbi szomszédja vele azonos körön fekszik. A középponttól távolabb a legközelebbi szomszéd a mellette lévő körön található, a kerület közelében pedig torlódás alakul ki. Ha az olvasó megdönti a könyvet, és ferdén szemléli az ábrát, azt találja, hogy a mintázat teljesen megváltozott. A változás azt a tényt tükrözi, hogy a rézsútos nézőpont kivetítési hatására megváltoztak a legközelebbi szomszédok

A tigrisek manapság nem jelentenek akkora problémát. Mi azonban örököltük azt a képességet, hogy olyan mintázatokat is észleljünk, amelyek bizonyos értelemben nincsenek igazán ott. A pszichológusok megpróbálták kihasználni azt a tényt, hogy ez a hajlam személyről személyre változik: elborult elméjű betegek kiértékelésére a Rorschach személyiségi tesztet használják. Érdekes dolog néhány egyszerű kísérletet végezni, hogy lássuk, miképpen működik a szem és az agy. A 7.1 ábrán látható rajz nagyszámú, pontokból álló koncentrikus körből áll. Minden kör azonos számú pontból áll, és egy adott kör pontjai a két szomszédos kör pontjai között félúton helyezkednek el. A pontok így mind egyenes vonalak mentén fekszenek, amelyek áthaladnak a körrendszer középpontján. Így a „valóban" létező mintázatok – abban az értelemben, hogy szándékosan kerültek bele a képbe – körök és egyenes vonalak. Ám mit észlel az emberi szem? A kép középpontjának közelében valóban látunk körkörös gyűrűket, kijjebb azonban a szem félhold alakú szirmokat emel ki. Azért teszi, mert az agy roppant mód ért ahhoz, hogy egy pont és legközelebbi szomszédja közé képzeletbeli vonalat húzzon. A kép középpontjában a pontok sűrűn sorakoznak a gyűrűkön, úgyhogy bármelyik tényleges pont legközelebbi szomszédja mellette helyezkedik el ugyanazon a gyűrűn. Ahogy a középponttól messzebb tekintünk, a pontok minden körön megritkulnak, és a legközelebbi szomszéd az egyik szomszédos körön helyezkedik el. Szemünk e legközelebbi szomszédok közötti, félhold alakú vonalakat rajzolja ki leghamarabb elménkben. További kísérletképpen döntsük meg a könyvet, és nézzük a képet a lap mentén. Látszólagos mintázatok új sorát fogjuk látni, mert a megváltozott perspektíva a legközelebbi szomszédok új sorát hozza létre. A mintázatok látószögünktől függően változnak. A 7.2 ábra megmutatja, milyen zűrzavart él át az agy, amikor nem tud egy mintázat mellett dönteni. Állandóan változtatja beállítását, és ez sajátságos, dinamikus hatást kelt. A 7.2 ábra észleletének képzésénél sok hatás szerephez jut, melyek közül nem a legjelentéktelenebb a kiugró vizuális jelzések elhelyezése a legközelebbi szomszédok által kirajzolt, kör alakú pontsorok közepén. A szem a szimmetrikus mintázatot azonosítja leggyorsabban.

Ennek az érzékcsalódáson alapuló kis játéknak komoly oldala is van. Jelenleg a csillagászok éppen azt próbálják eldönteni, vajon valóban léteznek-e jelentős, vonalakból és halmazokból álló belső mintázatok a galaxisoknak a világegyetemben mutatott eloszlásában. Mintázatok természetesen „látszanak" létezni, nem világos azonban, hogy ezek csupán véletlen hatások-e, amelyeket kiemel a szemnek a mintázatok iránti sajátos vonzódása, vagy pedig a galaxisképződési folyamat belső vonásainak tulajdoníthatók.

A mintázatot, a szimmetriát és a rendet pszichológiailag vonzónak találjuk. Az ókori kultúrák művészetében mindenütt megjelennek a tisztán díszítő

célból kifejlesztett, nagy bonyolultságú szimmetrikus mintázatok. Később kiderült, hogy e mintázatok és szimmetriák némelyike bonyolult matematikai tulajdonságokkal rendelkezik. A modern korban Maurits Escher rajzművész számos alkotásáról (lásd pl. az 5.1 ábrát) bebizonyosodott, hogy igen kifinomult matematikai szimmetriákat használ ki, amelyeket mindenfajta matematikai tudás nélkül, vizuális úton észlelt.



7.2 ábra. A Marroquin-féle minta. Ebben a mintában különböző mintázatok folyamatos áramlása látszik. A szem hajlamos egyre nagyobb és nagyobb, kör alakú mintázatokat azonosítani, amelyek végül feloldódnak, hogy átadják helyüket a mintázat kiugró helyi centrumainak. Ez a minta egy nehezebben megfogható mintázatot is rejt, melyet sok szemlélő nem is képes kivenni. A szem által könnyen észrevett legnagyobb körök belsejében egy-egy tizenkét oldalú „svájci" kereszt van berajzolva, és ez a mintázat periodikusan ismétlődik az egész mintában. (J. L. Marroquin: *Human Visual Perception of Structure.* Szakdolgozat, MIT, 1976; a MIT engedélyével.)

Eschert ezért a matematikusok feltehetően a művészetek terén kulturális attaséjukká fogadták. Mindezen dolgoknak nagyon mélyen kell aggasztaniuk a tudományos realistát. Úgy látszik, hogy az emberi agy képességet fejlesztett

ki geometrikus mintázatok felismerésére ott, ahol semmi ilyesmi nem létezik. Vajon mi mást ismerhet fel még, ami valójában nem létezik?

A realizmus egyik axiómája szerint (lásd 1. fejezet) a természeti jelenségek elválasztása észlelésüktől ártalmatlan egyszerűsítés. Lehet, hogy ez nem igaz. A természetnek geometriai tényezők és előrejelezhető szabályosságok irányította észlelése illúziónak bizonyulhat. Sőt lehetséges, hogy a természet különböző oldalai közül egyedül az ilyen rendezett irányzatok felismeréséhez van tehetségünk (nézzük meg újra a 7.2 ábrát, és próbáljuk felismerni az ábrát kitöltő, tizenkét oldalú svájci keresztekből álló hálózatot). Ezzel nem tagadjuk – mint egyes antirealisták tennék – az általunk észlelt és alkalmazott természeti törvények valóságosságát, mindössze nyitva hagyjuk annak lehetőségét, hogy az általunk feltérképezett óramű-világ nem a teljes egész. Lehet, hogy a természethez intézett keresztkérdéseink csak egy bizonyos típusú bizonyítékot tudtak napvilágra hozni, mert sikeres vizsgálati irányra akadtunk, és kérdésfeltevésünk megfelelő irányításával meg tudjuk határozni az igazság egészének azt a részét, amely előbukkan.

Ez a fajta szubjektivitás régóta aggasztja a mai filozófusokat és tudománytörténészeket. A tudománytörténet-írásnak van egy hagyományos módja, amelyet a történészek már nem használnak, ám megtalálható még számos, szaktárgyuk története iránt érdeklődő tudós írásaiban. Ez egyúttal az utca emberének a felfogása is arról, hogy miről szól a történelem. Valóban így tanították az iskolában: dátumok, emberek, események – hogyan érkeztünk el a jelenhez. A tudomány felemelkedésének e történetében megtalálhatjuk a ma már ismert „helyes" válasz előfutárait. Keressük csak ki a történelemkönyvekből azt, ki gondolta, hogy a Föld a Nap körül kering, még mielőtt Kopernikusz leírta volna? A térben és időben egymástól távol eső kultúrák e képviselőit a heliocentrikus világkép előfutáraiként összekapcsoljuk. A korokon át képzeletbeli vonalat húzunk, hogy feltérképezzük az általunk „helyesnek" ítélt útvonalat. Minden helytelen nézetet figyelmen kívül hagyunk. Ezt a megközelítést Herbert Butterfield a történelem „whig" elméletének nevezte el. E névvel azokra a korábbi történészekre utalt, akik a történelmet a szívüknek drága politikai rendszerben, a liberális demokráciában kicsúcsosodó események feljegyzésének tekintették. A tudósoknak saját szaktárgyuk történetéről festett képe is gyakran e téveszmén alapul. Olyan ez, mintha a természet realista megközelítését kiemelnénk hasznos összefüggéséből, és a tudomány menetére alkalmaznánk, azt gondolva, hogy csak egyetlen igaz tudománytörténet van, amely vagy helyes, vagy helytelen. Természetesen létezik az események igaz lajstroma, ám csak egyetlenegy olyan van, amelyikben minden esemény benne van. A téves eszmék és pontatlan mérések szintén szerepet játszottak a tudományos felfedezés kiszámíthatatlan menetében.

A hivatásos történész inkább antirealista nézőpontra helyezkedik. Arra akar összpontosítani, hogyan csinálják a tudományt, ami roppant népszerűvé tette az operacionalista vagy instrumentalista nézetet (sőt, még a strukturalista nézetet is). Az általában Thomas Kuhn nevével összekapcsolt, megnyerő nézet azt a tényt emeli ki, hogy a tudomány *emberi* tevékenység, és ezért a tudósok tevékenységére alapozva egyfajta tudományszociológiát próbál kifejleszteni. Kuhnt az egyes tudományos eszmék iránti emberi elfogultság érdekli, nem az egyes tényleges példák skáláján, mint fenti képünkben, hanem a tudomány egész területén. Úgy gondolja, hogy az idő legnagyobb részében a tudósok szokványos robotmunkát végeznek, dolgokat mérnek és kalibrálnak, részleteket számítanak, kitöltik a tudás hézagait. A létező képen belül nem megoldható, alapvető problémák felmerülése következtében azonban fokozatosan kritikus helyzet alakul ki. Ám ekkor azonban valami forradalmi történik. Amikor a helyzet megérett, új eszme vagy „paradigma" merül fel, talán azért, mert egy régi eszmét minden kétséget kizáró módon megcáfoltak, vagy mert valaki messzemenő következményekkel járó, vadonatúj eszmével áll elő. A szaktárgy ekkor a gyökeres átalakulás időszakán megy keresztül, amelyben az új paradigma válik a gondolkodás fókuszává, ezt az időszakot azonban később újra a normális tevékenységhez való visszatérés váltja fel. A normális tevékenységet az jellemzi, amit Kuhn „rejtvényfejtésnek" nevez, ami okosan megválasztott kifejezés, mert a rejtvény olyan probléma, amelynek biztosan van megoldása. Hasonlóképpen a normál tudomány tevékenysége is vélhetően olyan kérdésekre összpontosít, amelyekre megoldást kell tudni találni az érvényben lévő paradigmát meghatározó eszmék és rejtvényfejtő módszerek rendszerén belül. Néha nehézségek merülnek fel, és a paradigma csak bizonyos „anomáliákhoz" vezet, ha a belső ellentmondásokat „problémának" vagy „paradoxonnak" címkézve figyelmen kívül hagyják, vagy ha *ad hoc* elemző módszereket alkalmaznak. Végül is az ilyen természetellenes cselekedetek száma meghaladja azt, amit a paradigma még elbír, és – Kuhn szerint – bekövetkezik a forradalom, amelyből az előzőnek mind sikereit, mind pedig nehézségeit kezelni képes, új paradigma emelkedik ki. A paradigma halott; éljen a paradigma!

Ez a szókészlet, a paradigmák és a rejtvények beleolvadtak a tudósok keveréknyelvébe. A legtöbb tudós mégis ösztönösen tagadná a Kuhn elemzésének mélyén rejlő feltevéseket. Kuhn számára a tudomány sem nem helyes, sem nem helytelen. A problémák nem megoldódnak, hanem feloldódnak. A természeti törvények, ahogy a tudósok észlelik őket, sem nem igazak, sem nem hamisak. A paradigma – átmeneti divat, nem pedig művészi stílus. Minden tudós egyik vagy másik paradigma rózsaszín szemüvegén át szemléli

a világegyetemet. Szükségtelen is mondani, hogy ez a nézet irtózat tárgya Karl Popper tanítványa számára, akit realista meggyőződése annak fenntartására indít, hogy léteznek a különböző tudósok által egyetemesen elfogadható, határozott állítások, a tudósok ugyanis a valóság tényeivel szemben a cáfolat kísérleti próbájához folyamodhatnak.

A tudományfilozófiában is vannak divatos gondolatok, és Kuhn elképzelése csak egy ezek közül. Ha hiszünk magának Kuhnnak, végül a tudomány haladásáról általa rajzolt kép is ellentmondásokkal és kétértelműségekkel terhelődik meg, és egy új, jobb elképzelés lép majd a helyébe. A folyamat valójában már meg is kezdődött. A kuhni elmélet népszerű nézete változatlanul *A tudományos forradalmak szerkezete* című híres művének 1962-ben kiadott első kiadásán alapul. A művet azonban számos kritika érte a terminológia határozatlansága és következetlenségei miatt (egy Kuhn által is rendkívül alaposnak tartott kritikus a „paradigma" szó huszonegy különböző használatát azonosította!), és a könyvnek később lényegesen javított kiadásai jelentek meg. 1974-ben végül Kuhn feladta korábbi nézetét a paradigmákról, hogy tudniillik ezek a tudomány menetét forradalmi megszakításokon át hajtó, mélyen rejlő világnézetek. Ahelyett, hogy a tudományszociológiát valamilyen átfogó dinamika rendszerében kísérelte volna meg leírni, a kutatás irányát kicsiny, ám befolyásos kutatócsoportokon belül diktáló paradigmák mikroszociológiai értelmezése felé fordult. Ez a nézet kevésbé meglepő, és jóval kevésbé ellentmondásos, mint elődje, de végső soron mégiscsak önmagát megdöntő filozófia.

Kuhn nézetének bökkenője az, hogy az időszakosan elfogadott, majd elvetett átmeneti paradigmák sem nem helyesek, sem nem helytelenek: pusztán eszközök, melyeknek az uralkodó vélemény által meghatározott, időleges hasznosságuk van. Nézete voltaképpen ítélet arról is, amit a tudósok csinálnak. Arra az álláspontra helyezkedik, hogy a tudósok semmi olyat nem fedeznek fel, ami valóban igaz. Végül anomáliákat szül összes tudományos nézőpontunk, és ezért új nézőpont vagy paradigma veszi át a helyét mindaddig, amíg szintúgy könnyűnek nem találtatik. Ezenkívül nem kizárólag objektív alapon hozzák meg azt a döntést, hogy két versengő elmélet közül melyik váljék elfogadottá. További, szubjektív szempontok is szerephez jutnak, mint például a hatókör, az egyszerűség vagy a szimmetria. Különböző paradigmák híveinek különböző elképzelésük lehet arról, milyen döntő próbával lehetne valamelyik elmélet felsőbbrendűségét bizonyítani. A kuhni nézet jó leírása a 7.3 ábrán bemutatott optikai csalódásnak: a tudósok egyik csoportja az elbűvölő fiatal nőt látja, míg a többiek a vén boszorkányt. Kinek van igaza? Kuhn válasza: attól függ, mit keresünk.



7.3 ábra. E. G. Boring amerikai pszichológus példája, amely hirtelen alak-(Gestalt-)eltolódáshoz vezető észlelési kétértelműséget mutat. A szem rendelkezésére álló információnak nem szükséges megváltoznia, új elrendeződése azonban drámai újraszerveződéshez vezet, amikor a kép egy fiatal nő arcáról egy idős nőére vált át, vagy fordítva. (R. L. Gregory *The Intelligent Eye* című művéből – Weidenfeld és Nicholson, London 1970. –, a kiadó szíves engedélyével.)

Sok vita folyt már arról, találó-e ez a leírás: egy bizonyos világképet elfogadva normális tevékenység folyik, ezt pedig egyre mélyülő válság követi, amely „tudományos forradalmat" és egy új feltételezés-rendszer elfogadását eredményezi, és így tovább a végtelenségig. E vélekedés bizonyosfajta, igazából rendkívül nehezen megfogható tömegpszichózist tulajdonít a tudománynak. A tudomány gyakorlatát valószínűleg csak azért lehetséges e leírás korlátai közé szorítani, mert ugyanez szinte bármilyen tevékenységgel megtehető: akár a szervezett bűnözésről van szó Chicagóban, akár magasugró stílusokról, terrorizmusról, futballtaktikáról, autótervezésről, a párizsi divatról vagy bármiről, Kuhn elmélete mindegyikre ráhúzható. Azáltal, hogy a tudománytörténetet ugyanúgy próbálja kezelni, mint a művészettörténetet – mint a különböző stílusok jövésének-menésének történetét –, ez a fajta leírás figyelmen kívül hagyja a tudomány alapjául szolgáló tények körét és szerepét a tudósok viselkedésének és érdeklődésük irányának meghatározásában. Egy-egy

tudományterületen belül leggyakrabban a tények tárházában bekövetkező változás vezet alapvető megújuláshoz. Az is vitatható, hogy történt-e valaha is olyan tudományos forradalom, amilyenről Kuhn ír. Az új elméletek gyakran magukban hordozzák a régit, a korábban sejtettnél általánosabbnak bizonyult jelenség sajátos példájaként. A haladás inkább egy történet újraírásához és módosításához hasonlít, nem pedig stilárisan forradalmi átalakításához, mint amilyen, mondjuk, a filmre vitele volna.

Ha Kuhnnak igaza van, akkor voltaképpen érdektelen, hogy léteznek-e természeti törvények, ha igen, milyen formában, mert a tudomány teljességgel emberi tevékenység, amely nem derítheti fel őket. A kuhni tudomány – a fényt részben visszaverő tükör előtt ülő tudós. Popper hajlandó volna elismerni, hogy csaknem bizonyosan sohasem fogjuk felfedezni *a* természeti törvényeket, annyira mélyen ágyazódnak bele a valóságba, ennek ellenére léteznek egyedi és egyetemes törvények. Kuhn ezzel szemben a természeti törvényeket a tudós elmék állandóan változó szüleményének tekinti, a megfigyelő és a megfigyelt közti szimbiotikus pszichológiai kapcsolat részének. Ez a lehető legszélsőségesebb és legátfogóbb nézet arról a szubjektivitásról, amely a természetnek az emberi intellektus általi tanulmányozásában megjelenik: ez az az álláspont, amely felismerve, hogy létezik tudományszociológia, arra a következtetésre jut, hogy a tudomány nem egyéb, mint saját szociológiája.

A laboratórium fantomja

> A tudomány nem képes a természet végső rejtélyét megfejteni. S ez azért van így, mert végső soron mi magunk is részei vagyunk a rejtélynek, amelyet megoldani próbálunk.
>
> Max Planck

Francis Bacon, amikor elvetette Arisztotelésznek és középkori követőinek deduktív logikai érvelését, ezt abbéli meggyőződésében tette, hogy tudásunknak a természetről megtudott dolgokon kell alapulnia, nem pedig a múlt filozófiai rendszerei által elménkben dajkált fantomokon és előítéleteken. Négy különös „idólum"-tól (ködképtől) óvott, amelyekről úgy gondolta: rossz irányban befolyásolják természetről való gondolkodásunkat, és zsákutcába terelik a természet valódi törvényeinek keresését. Olyan hatások ezek, amelyek közénk és a megfigyelni és megérteni próbált világról szóló nyers igazság közé tolakodnak.

Bacon először is arra figyelmeztet, hogy *a törzs idóluma* lakozik bennünk: azok a hajlamok, amelyek emberi mivoltunk melléktermékei. Szeretjük azt hinni, hogy az évszázadok során a lehető legkisebbre csökkentettük ezeket a hatásokat, amelyek miatt egykor oly természetes volt hinni, hogy az ember a világegyetem középpontja és a természet minden működésének gyújtópontja, és minden a mi kényelmünket és javunkat szolgálja. Amint az amerikai fejlődésbiológusok nemrég rájöttek, ezt az előítéletet nem könnyű legyőzni. Az utolsó részben láttuk, hogy sokmillió év természetes kiválasztódása milyen túlérzékennyé tette mintázatfelismerő képességünket. A törzs ködképei nem korlátozódnak szükségszerűen a „törzsi" előítéletekre, azokat a szükségszerű fiziológiai tulajdonságokat is magukban foglalhatják, amelyek a pszichológiai előítéletek továbbélését lehetővé teszik.

Bacon ezután azokra a személyes előítéletekre mutat rá, amelyek mindannyiunkban megvannak: ezeket *a barlang idólumai*nak nevezi. E ködképek még mindig velünk vannak. Egyes tudósok nem szívlelik szakterületük bizonyos fejlődési irányzatait, és még a szaktárgyuk területén való közreműködéssel is felhagynak abban a reményben, hogy e rosszízű, új eszmék kimennek majd a divatból. Az effajta egyéni előítélet néha szilárdan megalapozott – lehet, hogy az új kutatási irány oly magas szintű matematikai vagy kísérleti technika alkalmazását követeli meg, amellyel a tudós tapasztalat vagy hozzáértés hiányában nem képes megbirkózni; gyakran azonban sokkal emberibb oka van – lehet, hogy az új fejleményt olyasvalaki kezdeményezte, akit tudósunk ki nem állhat, és nem tudja elviselni azt a gondolatot, hogy az ő ötleteinek megvalósításán dolgozzon!

A torzítás harmadik forrását Bacon *a piac idólumai*nak nevezi, ami ravaszabb a többinél. Ma talán inkább az egyetem *idólumai*nak kellene hívni őket. A tudósok egymás közti kapcsolataiból ered, és meghatározott nyelv használata, bizonyos közös elképzelések és a matematika közös alkalmazása együttes eredményeként tapasztalható. Nevezetesen ez a ködkép állhat a filozófusok zajos egyetértése mögött a tudomány értelmét és módszerét illetően. Úgy látszik, hogy Kuhn lehengerlő és kikerülhetetlen előítéletnek tartja ezt; a paradigmák nem esnek messze az idólumoktól. Mi több, a ködképek e kategóriájába illik Kuhnnak az a későbbi gondolata is, mely szerint a paradigmák befolyásos kutatócsoportokon belül tevékenykedő kisebb tudóscsoportok hatására alakulnak ki.

Utoljára marad az, amit Bacon az objektív gondolkodásra való képesség legveszélyesebb ellenségének tartott: *a színház idóluma*. A múlt és jelen nagy filozófiai rendszereit színdarabnak tekinthetjük abban az értelemben, hogy a világon belül egy külön világot teremtenek: saját tájakkal és szereplőkkel rendelkező világot. Bacon figyelmeztet arra, hogy a valódi világnak e filozófiai

modelljei csak modellek. Ha elfeledkezünk a megmagyarázni próbált valóságtól való különállásukról, annak a színházlátogatónak a hibájába esünk, aki összekeveri az előtte lévő színpadon lejátszódó jelenetet a darab által ábrázolni kívánt való élettel. Lehet, hogy a darab a valóságon alapul, lehet, hogy még gazdagabb és merészebb is, mint a valóság, mindazonáltal mégis csak mesterséges világ. Mielőtt a XX. századi tudomány ugrásszerű felemelkedése megkezdődött volna, a tudósok munkájában kifejezettebbek voltak és fontosabb szerepet játszottak a filozófiai nézetek. A gondos megfigyelő számára ma sem kevésbé nyilvánvalóak, ám nincsenek kimondva, vagy még szándékosan el is vannak homályosítva. Így például tudományos közleményekben szégyenkezés nélkül megjelenik az a hit, hogy a minden létező egységes elmélete egyértelműen és teljesen megmagyarázza majd a világegyetem szerkezetét, pedig ez lényegében vallásos vagy metafizikai nézet abban az értelemben, hogy egy kimondatlan vagy elhallgatott hitbéli axiómán alapul.

Bacon azt ismerte fel elsőként és igen sürgető időszerűséggel a tudományról, hogy – lévén emberi tevékenység – eredményei szükségképpen emberi előítéletekkel terheltek. Ennek ellenére a kísérletezők sok-sok őt követő nemzedéke nemigen olvasott ki mást intelmeiből, mint hogy „őrizkedjetek Arisztotelésztől és a skolasztikusoktól".

Hibák

Nem az számít, amit nem tudunk, *az* nincs úgy, amit tudunk.

Will Rogers

Kopernikusznak és Newtonnak nem volt világos elképzelése arról, amit mi „tudományos hibának" neveznénk. A kísérletező tudós számára a „hiba" szónak tágabb értelme van, mint az utca embere számára, akinek ez egyszerűen „tévedést" jelent, valamilyen baklövést, mint például rosszul leolvasni egy hőmérőt, rossz vegyszereket keverni össze vagy hagyni az atomreaktort, hogy túlmelegedjen. Ez azonban nem az elsődleges jelentése a „tudományos hiba" kifejezésnek. A tudós számára két további jelentése is van.

Az első egyértelmű: valamely mennyiség mérési pontosságának határa. Az ilyen *kísérleti hiba* szemléltetésére jó példa valaki életkorának a megállapítása. Ha az illetőnek csak a születési évét ismerjük, akkor pillanatnyi életkorát csak 12 hónapos *tartományon* belül tudjuk megmondani. Ha azt halljuk, hogy egy fadarab egyméteres pontossággal mérve 6 méter hosszú, csak annyit tudunk,

hogy a hossza 5 méter 50 cm és 6 méter 50 cm közé esik. Ez a fajta „hiba" a mérőeszközeink vagy a kapott adatok pontosságának korlátait adja meg: megmondja, mekkora az a legnagyobb hiba, amelyet még akkor is elkövethetünk, ha hozzáértő módon végeztük a mérést, és nem követtünk el semmi ostobaságot, pl. nem olvastuk le rosszul a vonalzót. Ez a fajta hiba nem túlságosan érdekes, ám a kísérletező tudósnak nyilvánvalóan az az egyik célja, hogy minél alacsonyabb értékre szorítsa le. A megfigyelések és kísérleti mérések mit sem érnek, ha nem adják meg a lehetséges kísérleti hiba értékét is. Az a kijelentés, hogy egy közvélemény-kutatásban a Konzervatív Párt 5 százalékkal vezet a Munkáspárt előtt, értelmetlen statisztikai adat, hacsak nincsen megadva a bizonytalanság vagy a kísérleti hiba értéke is.

Korábban már láttuk, hogy a kvantummechanikában a Heisenberg-féle határozatlansági elv következtében minden mennyiség mérése elkerülhetetlen hibával jár, még akkor is, ha a mérőműszerek kifogástalanok (a gyakorlatban természetesen sohasem azok). E különös korlátozás azért jelentkezik, mert maga a megfigyelés folyamata elválaszthatatlan a mért állapottól. A világegyetem tökéletes ismerete lehetetlen, mert a megismerés aktusa megismerhetetlen módon befolyásolja a világegyetemet. Olyan, mintha kissé megváltozott volna, mire feljegyezzük állapotát. Ezért a fizikai világban végzett minden lehetséges megfigyelésnek véges mérési hibával kell rendelkeznie. A gyakorlatban azonban a tudományos mérések pontosságát korlátozó mérési hiba még az elemi részecskék fizikájában is lényegesen nagyobb, mint a kvantumelmélet által meghatározott, tovább nem csökkenthető minimum. A kísérleti pontosság csak a kvantumfolyadékok abszolút nulla fokhoz közeli hőmérsékleteken végzett vizsgálataiban közelíti meg a heisenbergi határt.

Méréseink pontosságának gyakorlati korlátait a múltban nehezen ismerték fel. Kopernikusz tudta, hogy ha a bolygók a Nap körüli pályájukon elliptikus úton haladnak, akkor elegendő a bolygó pályájának két pontját megfigyelni az elliptikus pálya meghatározásához.* Ezért aztán nem értette, hogy az általa minden egyes bolygó pályáján megfigyelt pont-párok miért nem határozták meg a bolygó által a jövőben ténylegesen követett pályát. Ennek az volt az oka, hogy a helyzetmeghatározások nem voltak teljesen pontosak. Azzal a tartománnyal, amelyen belül a valódi helyzetek lehettek, több, egymástól kissé különböző ellipszis is összeegyeztethető volt. Hasonlóképpen még Newtont is

*A szerző megállapítása téves. Kopernikusznak fogalma sem volt elliptikus pályákról, még Galilei is csak *körpályákat* fogadott el. Az elliptikus pálya gondolata (Kopernikusz halála után ötven évvel) Keplertől származik. – *Fehér Márta*

zavarba ejtette, hogy az égitestek mért mozgásai miért nem illeszkednek pontosan matematikai előrejelzéseihez: a válasz ismét az, hogy a mérések a műszerek korlátozott pontossága miatt kis hibákat tartalmaztak; úgy látszik azonban, hogy ez a gondolat e régi tudósok számára teljesen idegen volt.

A kísérleti tudományokban jelentkező második fajta hiba forrása nehezebben azonosítható, következményei pedig komolyabbak, mert az ember sohasem lehet biztos még abban sem, hogy azonosította, nemhogy abban, hogy minimalizálta vagy kiküszöbölte volna őket. A hibáknak ezt a válfaját *„kiválasztási hatás"*-nak vagy *„szisztematikus hibá"*-nak nevezzük, azonosításukhoz pedig alapos meggondolásra és a vizsgált jelenség széles körű felmérésére van szükség. Létük megdönti azt a gyerekes elképzelést, hogy a tudományos elméletek próbára tételéhez nem szükséges más, mint a kísérleti módszer. A kísérleti helyzetek és a megfigyelési eljárások valamiképpen „hajlamosak" arra, hogy bizonyos típusú tényeket könnyebben begyűjtsenek, mint másokat. Annak érdekében, hogy bizonyosan azt figyeljük meg, amit megfigyelni vélünk, mindig szükségünk van a megfigyeléseket lehetséges módon befolyásoló jelenségek tágabb spektrumának valamelyes elméleti ismeretére.

Képzeljük el, hogy ön kutatási programot indít az összes lehető információ összegyűjtésére a patkányok méretéről. Ennek érdekében sok kis patkánycsapdát tervez, hogy példányokat fogjon be. Minden csapda egy-egy tíz centiméter hosszú kis doboz, a végei ötször öt centiméteres négyzetek. Egyik végükön fölül zsanérokkal ellátott ajtó van, amely azonnal lecsapódik, és szorosan bezáródik, amint a csapdába merészkedő patkány hozzáér a doboz túlsó végén elhelyezett élelemhez. A terv jól beválik. A csapdák néhány heti működtetése után ön megállapítja, hogy már több száz élő patkányt fogott. Leméri a súlyukat, a hosszukat, és gondosan megfigyeli őket. Ám más, sürgős dolgok jönnek közbe, Tahitiba kell utaznia egy nemzetközi konferenciára, és nem tudja a mérések elemzését befejezni. Mivel arra már nincs ideje, hogy megmagyarázza, miképpen végezte a kísérletet, a laboránsa asztalán hagyja az állatok méretének listáját, és megkéri, hogy készítse el az előzetes analízist. Amikor visszatér, a laboráns már izgatottan várja, és azzal fogadja, hogy nagyon fontos felfedezést tett a patkányokkal kapcsolatban. Bejelenti, hogy perdöntő bizonyítékok alapján a patkányok mérete határozott maximumot mutat: tíz centiméter testhosszig minden méretű patkány egyforma gyakorisággal fordul elő, magasságban és szélességben pedig egyetlen patkány sem haladja túl az öt centimétert.

Némi gondolkodás után rájövünk, hogy ez az állítás semmit sem mond a patkányokról. Kísérletünk a „kiválasztási hatás" otromba példájának áldozata: öt centiméternél magasabb vagy szélesebb patkány be sem juthatott csap-

dáinkba. A hét centiméter széles patkányok megfigyelésének hiánya csak a kísérletről mond valamit, míg a patkányokról semmit. A patkányok méretéről alkotott átfogó képet egyoldalúan befolyásolta az a tény, hogy a kísérletben lehetetlen volt nagyméretű patkányokat befogni.

Az efféle kísérleti torzítások a gyakorlatban nem ennyire durvák, sőt némelykor még el is kerülhetők. A csillagászokat például érdekelheti, hogy milyen a csillagok vagy galaxisok fényesség szerinti megoszlása. Bármilyen eredményt kapnak is, a fényesebb objektumok aránytalanul magas százalékban lesznek képviselve a mintában, mert könnyebb észrevenni őket. Az ilyen torzításokban az a kellemetlen, hogy bármilyen óvatosan járunk is el, sohasem lehetünk teljesen bizonyosak abban, hogy mindet teljesen kiküszöböltük. Jó kísérletezőnek lenni tulajdonképpen nagyrészt a szisztematikus hibák észrevételének és kiküszöbölésének művészete. A földi tudományos kísérletekben vagy adatgyűjtésben e torzításokat általában a méréshez használt készülék és módszer határozza meg, ezért ha a mérést – lehetőleg más módszert használva – egy másik, független kísérletben meg lehet ismételni és ugyanaz az eredmény jön ki, akkor igen valószínűtlen, hogy számottevő szisztematikus hiba történt. Ez a fő oka annak, hogy a tudósok annyira kétkednek a meglepő kísérleti felfedezésekben addig, amíg azok más, eltérő kísérletekben igazolást nem nyertek: nincs független adatuk a lehetséges szisztematikus hiba nagyságára.

Előfordul, hogy egy kísérlet torzulása elkerülhetetlen mérési hibával együtt jelentkezik. Erre a XVIII–XIX. századból említhetünk egy híres példát, ismét a csillagászat területéről. Friedrich Bessel, a tekintélyes matematikus és csillagász, akinek az alkalmazott matematika egyik leghasznosabb egyenletének bevezetése mellett még a Sirius B csillag felfedezésére is jutott ideje, a nagy (egyesek szerint a legnagyobb) matematikus, Johann Karl Friedrich Gauss munkatársa és barátja volt. Gauss az elsők között volt, akik megértették a mérési hiba fogalmát, és kidolgozták matematikai kezelését. E tudását megosztotta Bessellel, aki így meg tudott oldani egy nehéz csillagászati dilemmát.

A XIX. század vége felé a Greenwichi Királyi Obszervatórium csillagászai kicsiny, de bosszantó hibákat fedeztek fel a csillagok mozgásáról tett megfigyeléseikben. Az egyes megfigyelők más és más értéket kaptak arra az időtartamra, amely alatt a csillagok a távcső látóterében húzott két vonal közti távolságot megteszik. A kor királyi főcsillagásza, Neville Maskelyne úgy vélte, hogy az őáltala és a segédje által mért áthaladási idők közti tűrhetetlen eltérés pusztán a segéd alkalmatlanságának következménye. Bessel rájött, hogy valójában mi volt a mérések eltérésének forrása, és ami még fontosabb, arra is, hogy miképpen lehet azt helyreigazítani. A különböző csillagászok reakciósebessége eltérő volt. Egyesek mindig egy töredékmásodperccel előbb jelezték

a csillag áthaladását az első referenciavonalon, mint mások. Az elektronikus időmérő eszközök feltalálása előtt az atlétikai versenyeken is hasonló nehézségekkel küszködtek. Egyes időmérő bírák hajlamosak rövidebb vágtaidőket mérni, mint mások, és ugyanazt a versenyt bírálva a legtöbb időmérő bíró rövidebb időt mér, mint az elektronikus eszközök. A hibahatár a világrekord megdöntése és a jó eredmény közti óriási különbséget jelentheti. Éppen ezért ma már csak az elektronikus úton értékelt teljesítmények kerülhetnek be a rekordok könyvébe. Visszatérve a csillagászathoz: Bessel minden csillagászt egy úgynevezett „személyi egyenlettel" látott el, amely kiegyenlítette egyéni hajlamaikat az óra gyorsabb vagy lassúbb megnyomására, amikor egy-egy csillag belépve vagy kilépve áthaladt a távcső látóterében elhelyezett referenciavonalakon. Ez az eljárás kiegyenlíti az egyéni beállítottság miatt jelentkező „kiválasztási hatást", és egészen a legújabb, automatizált elektronikus mérési módszerek bevezetéséig használatban is volt.

A „Groucho Marx-effektus"

> Nem szeretnék olyan klubhoz tartozni, amelyik hajlandó lenne felvenni tagjai közé.
>
> Groucho Marx

Kiválasztási hatások nemcsak a kísérleti tudományokban jelentkeznek: elméleti és matematikai kutatásainkat is befolyásolják. Különösen gyakoriak az elméleti fizikában. A fizika alapvető területein, amelyek a gravitáció, a kvantumelmélet és az elemi részecskék mikrovilágának megértését próbálják előbbre vinni, a szokásos helyzet a következő: van egy elegáns, nemlineáris egyenletrendszerünk, sok mennyiséggel, amelyeket egy hatalmas invarianciaelv alkalmazásával nyertünk, és amelyek a természet éppen tanulmányozott vonásáról való összes tudásunk lényegét magukban foglalják. A legnagyobb probléma azonban az, hogyan *oldjuk meg* ezeket az egyenleteket, és jussunk ezáltal abba a helyzetbe, hogy kidolgozhassuk, mi a mondanivalója nagyszabású elméletünknek ismeretlen helyzetekről, hogy az előrejelzéseket aztán ellenőrizhessük, összehasonlítva őket az ilyen körülmények között látottakkal. Einstein általános relativitáselmélete például olyan gravitációs elmélet, amely tíz bonyolult parciális differenciálegyenletből áll. Az egyenleteket egyidejűleg meg kell oldani ahhoz, hogy megállapíthassuk, miképpen reagál a tér és az idő geometriája a benne lévő energia és anyag jelenlétére, és ez a geometria hogyan határozza meg, merre mozogjanak a tömegek. Ahhoz, hogy az elmélet egyen-

leteinek helyességét próbára tehessük, meg kell találni megoldásukat. Találhatunk olyan megoldást, mely leírja a Nap jelenléte miatt a bolygókra ható gravitációs teret, ha a Napot ideális gömbnek tekintjük. Ez a megoldás előre jelzi, hogy a bolygók a Newton-féle gravitációs elmélet által megjósolttól kissé eltérő pályán haladnak. Az eltérés a Naphoz legközelebb lévő bolygó, a Merkúr esetében a legfeltűnőbb, amelyre a legnagyobb a Nap gravitációs hatása. A megfigyelések megerősítik az Einstein elmélete által megjósolt kismértékű új hatást, és megmutatják, hogy a Nap alakja eléggé megközelíti a tökéletes gömböt ahhoz, hogy ez az idealizálás ne befolyásolja lényegesen a következtetést.

Nyilvánvaló, hogy ez az eljárás nem tökéletes. Az általános relativitáselmélethez hasonló fizikai teóriák egyenletei túl bonyolultak ahhoz, hogy teljesen meg lehessen őket oldani. Ezért nagymérvű idealizálásokhoz és leegyszerűsítésekhez kell folyamodnunk ahhoz, hogy megtudhassunk valamit az elméletben rejlő, és a teljes megoldásban is lehetséges módon megjelenő tulajdonságokról. Jellemző stratégia az egyenletek megoldása valamilyen sajátos helyzetre: például – mint az idealizált, gömb alakú Napnál – olyan esetre, ahol egyszerűsítő szimmetria van. Találhatunk például olyan megoldást, amely megadja egy *gömb alakú* tárgy gravitációs terét, vagy egy olyan tárgyét, amely az időben nem változtatja alakját. Az ilyen idealizálások megakadályozzák bizonyos típusú változások megjelenését az egyenletekben, és rendkívüli mértékben leegyszerűsítik őket, s ennek eredményeként általában megoldhatók lesznek. Einstein általános relativitáselmélete esetében az egyenletek első megoldásait változatlan, gömb alakú anyagkonfigurációkra dolgozták ki. Einstein először 1915-ben írta le egyenleteit, és azóta egyfolytában keresik megoldásaikat. Néhány évvel ezelőtt négy matematikus négyszázoldalas könyvet írt, amely az eddig talált legfontosabb megoldásokat mutatja be, osztályozza és rendszerezi. A könyvben található megoldások mindegyike sajátos egyszerűsítésekkel él. Ezért volt lehetséges megoldani az egyenleteket.

Itt lép be a képbe a „Groucho Marx-effektus": az egyedüli megoldások, amelyek eléréséhez elég okosak voltunk, mindig sajátos, idealizált helyzetekre vonatkoznak, amilyenek a gyakorlatban általában nem fordulnak elő. Az ember korlátozott számítási képessége, valamint a számítógépek képtelensége arra, hogy az embernél többet teljesítsenek (leszámítva persze, hogy azt gyorsabban teszik) azzal jár együtt, hogy a fizikai elméleteinkből levont következtetéseink lényeges mértékben függnek viszonylag kis számú, pontosan megoldható példa tartalmától. Találhatunk Einstein egyenleteire olyan megoldásokat, melyek leírják, pontosan hogyan tágul az időben egy teljesen egységes szerkezetű világegyetem. A valódi világegyetem legnagyobb dimenzióiban *majdnem*, de azért nem teljesen egységes szerkezetű. Léteznek csillagok

és bolygók, galaxisok és halmazok – ezek az egyenetlenségek számunkra természetesen létkérdést jelentenek (egy teljesen egységes szerkezetű világegyetemben nem létezhetnek megfigyelők!). A mai kozmológia éppen azzal foglalkozik, hogyan és milyen kezdeti állapotból keletkeztek ezek a létezők. Sajnálatos módon Einstein egyenleteinek nem ismerjük olyan, pontos megoldását, amely egy csillagok és galaxisok összevisszaságával teli, táguló világegyetemet ír le. Kétségtelenül léteznek ilyen, a való helyzettel számoló megoldások, ám matematikailag túlságosan bonyolultak számunkra. Mi nagymértékben támaszkodunk arra a feltevésre, hogy a való világ minden bonyolultságában jól közelíthető egyszerű, idealizált helyzetekkel. Ez gyakran nem így van. Egy vízesés alján kialakuló, rendkívül bonyolult kavargás olyannyira eltér az ideális folyadékok áramlásától, hogy részleteiből nem sokat értünk.

Az idealizálás elkerülésének egyik lehetséges módja a megközelítések alkalmazása. Amellett, hogy idealizált helyzetek egyenleteinek pontos megoldását megtaláljuk, *majdnem* ideális helyzetek egyenleteinek közelítő megoldását is ki tudjuk számítani. Bár a világegyetem nem tágul minden irányban pontosan egyforma sebességgel, mégis majdnem így van (pontosabban egy tízezrednyi eltérésen belül), ezért úgy gondoljuk, hogy az idealizált megoldás adta megközelítő leírás körülbelül ugyanilyen pontosságú lesz. Várakozásunkat ebben az esetben igazolja a megfigyeléseink és az idealizált modell előrejelzései közti jó egyezés. Nagyon is lehetséges azonban, hogy vannak olyan idealizált megoldások, melyek semmilyen értelemben nem állnak közel a nem idealizáltakhoz. Az efféle elszigetelt példák a szokásostól eltérnének, és igencsak félrevezetnének minket arra vonatkozólag, hogy milyen az elmélet egyenleteinek teljes megoldása. Jó példa erre a logikával foglalkozó tudós, Kurt Gödel híres megoldása Einstein egyenleteire. Eszerint Einstein egyenleteinek van egy olyan, sajátos megoldása, mely lehetővé teszi az időutazást. Az ember megölhetné a saját nagyanyját, és ezzel tényparadoxont teremthetne (még az indukció problémáját is megoldhatná!). Gödel megoldása különös, körforgást végző, a miénkre semmiben sem hasonlító világegyetemet ír le, ez azonban nem jelenti azt, hogy nem kell többé az időutazás miatt aggódnunk. Azt kell megtudnunk, vajon az időutazás Einstein egyenletei teljes és realisztikus megoldásainak tulajdonsága-e – ezek írnák le a mi világunkat –, vagy csak kisszámú, fizikailag jelentéktelen, furcsa megoldás „kórképének" a része.

Ez pedig egy másik fontos szempontra hívja fel a figyelmet. Einstein egyenleteinek számtalan különböző, táguló világegyetemet leíró megoldása van. Az egyes megoldások kezdeti feltételei különböznek egymástól: némelyikben vannak galaxisok, másokban nincsenek. Ténylegesen, definíció szerint, azonban csak egyetlen világegyetem létezik. Mi az a kiválasztási elv, amely

éppen a *mi* megfigyelt világegyetemünket leíró megoldást és csak ezt szemeli ki? Ennek az elvnek az általános relativitáselméleten kívülről kell erednie.* E „kiválasztási elv" feltételezésének szükségessége azt mutatja, hogy Einstein elmélete a világegyetemnek nem a lehetséges legjobb leírása. Túl sok mindent enged meg, ami természetben nem valósul meg, azon kívül, ami megvalósul.

Sok fizikus kifejezte abbéli meggyőződését, hogy ha majd a természet különböző elemeit leíró, különálló elméletek egyetlen, mindent felölelő „egyesített térelméletben" összegeződnek, akkor az egészet felépítő részek alakjára olyan erős kényszer hat az összeillesztés érdekében, hogy csak egyetlen egyesített kép lesz lehetséges. Elképzelhető, hogy az összes alapvető jelenségnek egy és csak egy elmélete lehetséges, melyben minden, ami nem tilos, kötelező. Steven Weinberg, aki szintén reménykedik ebben, egy ízben így elmélkedett: „Ha a kvantummechanikát összerakjuk a relativitáselmélettel, azt találjuk, hogy szinte lehetetlen bármilyen lehetséges fizikai rendszert elképzelni. A természetnek valahogy sikerül egyszerre relativisztikusnak és kvantummechanikainak lennie, ám ez a két követelmény annyira korlátozza, hogy csak behatárolt választása marad, hogyan létezzen – remélhetőleg nagyon behatárolt választása."

Ha idealista módjára gondolkodunk, akkor egy ilyen elmélet jövőbeli „felfedezése" talán elkerülhetetlennek látszik, ha viszont realisták vagyunk, akkor természetesen nem reménykedhetünk ebben. Hiszen még ha létezik is a természet végső működésének e leírása, mi kezeskedik arról, hogy az emberi elmének hatalmában áll rátalálni? Sőt, éppen az utolsó fejezetben láttuk: arra az álláspontra is helyezkedhetünk, hogy nem létezik ilyen, minden létezőre kiterjedő, végső elmélet. Óriási elbizakodottságunkat kivéve semmi ok nincs arra, hogy a természet a mi számítási képtelenségünkhöz legyen szabva. A helyzet végső iróniája pedig abban rejlik, hogy még ha létezik is ilyen szuperelmélet, és fel is tudjuk írni, sohasem bizonyosodhatunk meg arról, hogy helyes-e. A tudományos módszer segítségével elméleteinknek csak hamisságát bizonyíthatjuk, helyességét nem. Bár előállhatunk a végső elmélet cáfolható változataival, *maga* a végső elmélet egyáltalán nem lesz cáfolható. Ezenközben minden olyan elméletről, amely nem adja mindennek egyesített leírását, előbb vagy utóbb ki kell derülnie, hogy valamilyen szempontból ellentmondásban áll a tapasztalattal.

*Valójában *bármilyen* téridő-geometria megoldása lesz Einstein téregyenleteinek *valamilyen* anyageloszlás mellett, éppúgy, mint ahogy bármilyen gravitációs potenciál megoldást ad Poisson téregyenletére valamilyen sűrűségeloszlásnál. Ezek az egyenletek csak azért korlátozzák a természetet, mert a legtöbb geometriát és potenciált kizárja az a követelmény, hogy a velük járó anyageloszlás fizikailag többféle értelemben valósághű (például az anyag sűrűsége mindenütt pozitív) legyen.

Annak is tudatában kell lennünk, hogy noha létezhet egy ilyen egyedülálló *minden létező elmélete*, ám ennek végtelen számú kozmológiai *megoldása* lehet, és a tényleges világegyetemet ezek közül csak egy, bizonyos tényleges kiindulási feltételeket alapul vevő megoldás írja le. Még problematikusabb az a tény, hogy a természetben mindenütt előfordul megsértett szimmetria. Lehet, hogy a világegyetem kulcsfontosságú tulajdonságai a *minden létező elmélete* mögötti szimmetria véletlenszerű megsértéséből erednek.

A természeti törvények teljesen meghatározott tára utáni kutatás nemcsak a logikát és a megfigyelést hívja segítségül. Az elmélkedés vezérléséhez metafizikai és esztétikai szempontokra is támaszkodnak. De ki a megmondhatója, hogy melyek a helyes esztétikai kritériumok: szépség, harmónia, szimmetria, a szimmetria hiánya, egyszerűség, kiszámíthatóság, végesség, tömörség, minimális feltételezések?

Szépség

> A varacskos disznó is bizonyára azt hiszi, hogy kicsinyei gyönyörűek.
>
> John Ellis

Milyen szempontok vezérlik a tudósokat a sikeres és erőteljes természettudományos elméletek felé? Láttuk már, hogy ezek az elméletek szükségszerűen matematikai formában jelennek meg. Van jó és rossz matematika, csúnya és szép matematika. Bármilyen nehéz is meghúzni a határt emez ellentétpárok között, a hivatásos matematikus számára nem nehezebb, mint a nappal és az éjszaka közötti különbséget meghatározni. Paul Dirac elméleti fizikus volt a legnyíltabb támogatója annak az eszmének, hogy a fizikai jelenségekre választ kereső elméleti fizikusnak elsősorban a „szép" matematika alkalmazására kell törekednie, azaz olyan matematikát kell űznie, amelyik szimmetrikus, formailag gazdaságos, a matematika más területeivel több szinten összefügg, és a bevitt adatok minimumából a struktúra maximumát hozza ki. A tudósnak az „egyszerűség" iránti vágytól áthatva kell ezt keresnie, elkerülve a fölösleges gondolatokat és hipotéziseket. A természet matematikai törvényeinek kereséséről Dirac ezt írta:

> A matematika fizikára való ilyetén alkalmazásának uralkodó elve az, hogy a mozgástörvényeket leíró egyenletek *formája egyszerű legyen*. Az elképzelés egész sikere annak köszönhető, hogy úgy látszik: az egyszerű egyenletek valóban működnek. ...Ez a módszer azonban fölöttébb kor-

> látozott, mert az *egyszerűség elve* csak az alapvető mozgástörvényekre vonatkozik, a természeti jelenségekre általában nem... A relativitáselméletet, jóllehet sérti az egyszerűség elvét, a fizikusok számára rendkívüli *matematikai szépsége* teszi olyannyira elfogadhatóvá. Ezt a tulajdonságot éppúgy nem lehet meghatározni, mint a szépséget a művészetben, ám a matematikával foglalkozók könnyen felismerik. A relativitáselmélet eddig sohasem látott matematikai szépséget vezetett be a természet vizsgálatába.
>
> Láthatjuk tehát, hogy az egyszerűség elvét a *matematikai szépség elvével* kell felváltanunk... Az egyszerűség és a szépség követelménye gyakran egybeesik, ám amikor ütköznek egymással, az utóbbit kell előnyben részesíteni.

Dirac egészen szélsőséges álláspontot képvisel, hiszen bizonyos esetekben még a negatív kísérleti bizonyítéktól sem hagyta magát eltéríteni a vizsgálati iránytól, amelyet matematikai szépsége és eleganciája miatt követett. Így folytatja:

> Ha az ember munkája és kísérlete között nincs teljes megegyezés, nem szabad túlságosan elkedvetlenednie, mert az eltérést kellően figyelembe nem vett, jelentéktelen tényezők is okozhatják, amelyek az elmélet továbbfejlesztése során eltűnhetnek.

Ez a két kijelentés igen meglepő. Jó példa egy bizonyosfajta kiválasztási hatásra. Kétségtelen, hogy mindannyiunknak van esztétikai érzéke, mely azonban nehezen magyarázható. Egyes vonásai általánosnak látszanak. Sokan úgy érvelnének, hogy ez teljes mértékben a természetes kiválasztódás eredménye, ám úgy látszik, hogy ahhoz képest fölöslegesen kifinomult elemei is vannak. George Santayana *A szépérzék* című művében úgy vélekedik, hogy „szépséget" olyan mintázatokban és külalakban észlelünk, melyek érdeklődésünk felkeltéséhez elegendő újszerűséget mutatnak, de mégsem annyit, hogy bonyolultságuk meghaladja felfogóképességünket. E lebilincselő tulajdonság megnyilvánulására a csillagos eget hozza fel példaként. Hemsterhuis, a XVIII. századi holland író úgy definiálta a szépséget, mint ami a legrövidebb idő alatt a legtöbb gondolatot ébreszti. A tudósok ebben a sajátos értelemben találják szépnek a természet egészét: kihívó problémákat állít elénk, amelyek a megoldás lehetőségét ígérik. Felébreszti és kielégíti a kíváncsiságot. A tudósok végül is inkább elemezhető, semmint csupáncsak egyszerű vagy szép egyenleteket akarnak. Emlékezzünk arra is, hogy merő spekuláció azt feltételezni, hogy a természet és törvényei szerintünk (vagy bármilyen értelemben) „szépek". A tudományos megfigyelés önmagában nem küszöbölheti ki annak lehetőségét, hogy világegyetemünket David Hume egyik „kiöregedett

istensége" alkotta, a valódi, egy másik időben és helyen felállított világ hibás előfutáraként!

A matematikai szépség egy másik definíciója Subrahmanyan Chandrasekhar Nobel-díjas indiai tudóstól származik. Szerinte Einstein általános relativitáselméletének elsősorban azért van esztétikai értéke, mert olyan csodálatos módon összeegyeztethetőnek bizonyult más természeti törvényekkel, amelyek nem játszottak szerepet megalkotásában. Pontosabb volna azonban csak annyit mondani, hogy az általános relativitáselméletnek van egy ilyen, váratlan harmóniával rendelkező magja. Az általános relativitáselméletnek vannak más részei, például az időutazást és a csupasz szingularitásokat megengedő megoldások, amelyek a fizika minden más törvényével összeütközésbe kerülnének, ha megvalósulnának a természetben.

A természet leírásában hasznosan alkalmazható a viszonylag egyszerű matematika is, nemcsak a legelvontabb és legnehezebb, bár annak is vannak hasznos részei. Talán ez vonzott a matematikai fizika területére olyan tehetséges embereket, mint amilyen Paul Dirac. Valószínűbb azonban, hogy Dirac, miután úgy találta, hogy a számára leginkább megfelelő tevékenység a matematika és a fizika művelése, a fizikának azokat az oldalait igyekezett hangsúlyozni, amelyek legközelebb álltak eszményeihez; ezek pedig, ha gyakran segítenek elő nagy felfedezéseket, eluralkodnak az ember szemléletén.

Ebben a tekintetben tanulságos szemügyre venni a matematikusok és fizikusok tanúsította érdeklődést a fraktálgörbék látványos képei iránt, amelyeket a számítógépek oly bőségben ontanak az utóbbi időben. Számos híres művészeti galériában állítottak már ki ilyen gyűjteményeket. E képek tagadhatatlanul szépek, és szépségüket tovább fokozza a számítógéptudósok bevezette hamis színkód ügyes megválasztása. Ezenfelül azonban olyan oldaluk is van, mely esztétikai élvezetüket a természetéhez kapcsolja. A fraktálok, mint például a Mandelbrot-halmaz (4.10 ábra) bonyolult szerkezete, közeli rokonságban állnak a természetes világban magunk körül látott, hasonló struktúrákkal: a lombtalan fa elágazása, a hópelyhek mintázata, a hegyi táj csipkézettsége mind olyan, nemlineáris invarianciát mutat, amelyet rendkívül tetszetősnek találunk. Sokáig tartott megtalálnunk azt a fajta matematikai algoritmust, amely módszeresen állít elő ilyen szerkezeteket, felfedezésük azonban bizonyára fontos szerepet játszik majd a vizuális szimmetria és a matematikai harmónia esztétikai értékelését irányító alapelvek meglelésében.

Nincs semmilyen ismert oka annak, hogy miért kellene a természeti törvényeknek „egyszerűnek", „szépnek" vagy bármilyen más, nekünk tetsző tulajdonságúnak lenniük. Sőt mi több, a Dirac által a fizika legcsúnyább és

legkevésbé kielégítő részének tartott elmélet, a kvantum-elektrodinamika összes alapvető tudományos elméleteink közül a legpontosabb. Nem más ez, mint a fény, az elektromos és mágneses erők kölcsönhatását leíró kvantumelmélet. Elméleti előrejelzéseit a kísérletek tíz tizedesjegy pontosságig igazolták. Egyes fizikusok ezt az elméletet is „szépnek" tartják!

Ebből a szintúgy szubjektív fejtegetésből mindössze azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a tudósokat tudatos és öntudatlan elfogultságaik űzikhajtják a természet bizonyos típusú leírásainak és törvényeinek kifejlesztésére. Minél inkább matematikai természetű valamely tudomány, annál erőteljesebb elfogultságaik hatása. A szimmetriák és invarianciák keresése a matematikai fizikus egyik célja. Nincs valódi bizonyíték arra, hogy a természet bármilyen jól körülhatárolható értelemben „egyszerű" vagy „szép" volna. Sőt, a legtöbb természeti jelenséget az egyszerűségnek álcázott rendkívüli bonyolultság fémjelzi. Annak a csillagásznak a története ötlik az ember eszébe, aki a csillagokról szóló nyilvános előadását ezekkel a szavakkal kezdte: „A csillagok igen egyszerű testek." Mire a terem túlsó végén valaki felkiáltott: „Maga is roppant egyszerűnek látszana kétszáz fényév távolságból!" Még figyelemreméltóbb az, hogy ma már nagyon hiányosnak, sőt helytelennek tudott elméletek és leírások milyen hosszú időn át mennyire megbízható ideiglenes vezérfonalként működtek közre az igazság jókora részének kiderítésében.

Diracnak az elegáns matematika csábító voltáról tett megjegyzései egy realista természetes álláspontjáról vallanak, aki hisz abban, hogy a természet belső lényegét tekintve *valóban* matematikai jellegű. A természet és matematikai ábrázolása így egyenértékűnek tekinthető, és az előbbi vitathatatlan szépsége keresendő az utóbbi felé való tapogatódzásunkban. Eltérő metafizikai beállítottságú tudósok mégis egészen másképpen érveltek, mint Dirac. Egyes operacionalisták, például Bridgman, kimondottan veszélyes metafizikai elhajlásnak tekintik az esztétikus matematikai struktúrák keresését a fizikai leírásokban. Az általános relativitáselméletről, amelyet mind Dirac, mind Chandrasekhar, mind pedig a legtöbb fizikus a „legszebb" elméletnek tart, Bridgman így ír:

> Jó néhány kozmológusnak a matematikához fűződő viszonyában hatékony metafizikai elemet érzékelek. Metafizikain azt a feltételezést értem, hogy érvényben vannak olyan dolgok, amelyeket nem lehet operacionálisan ellenőrizni... Mindenesetre metafizikai természetűnek kell nevezni azt a meggyőződést, hogy a világegyetem pontos matematikai elvek szerint működik, amiként az ebből adódó szükségszerű következtetést is, mely szerint valamilyen szerencsés bűvészmutatvánnyal megfogalmazhatjuk ezeket az elveket. Úgy vélem, hogy ez a hozzáállás rejlik számos kozmológus ama érzései mögött, amelyeket Einstein általános relativitás-

elméletének differenciálegyenletei iránt táplálnak. Ha például egy kiemelkedő kozmológussal beszélgetve megkérdezem, miért nem adja fel Einstein egyenleteit, ha egyszer annyi gondot okoznak neki, azt válaszolja, hogy ez elképzelhetetlen, hiszen egyedül ezekben lehetünk igazán bizonyosak.

Bridgman tudományfilozófiája természetesen puszta eszköznek tekintette a matematikát fizikai mennyiségek operacionális meghatározására (bár el kellett ismernie, hogy az operacionalista felfogás nem tud mit kezdeni a kozmológia tudományával, amelyben operacionálisan meghatározhatatlan mennyiségekről van szó, mint amilyen például „a világegyetem tömege"). Bridgman a matematika konstruktivista értelmezését tette magáévá, amely a formalizmussal volt határos, és ezt a fizikában vallott operacionalista filozófiája természetes kiegészítőjének tekintette. A természetben matematikai struktúrát feltételező „metafizikai" hajlamunk felismerésétől tovább haladva kifejti, hogy ez a megkérdőjelezhetetlen feltételezés veszélyes emberi előítélet:

Úgy vélem, hogy veszélyek rejlenek minden olyan tárgyban, melyben ennyire szétválaszthatatlanul keverednek a tisztán „tudományos" és „emberi" elemek. Különös veszélyét látom annak, hogy tényleges ellentmondásokkal terheljük meg a rendszert, ha a matematika iránti metafizikai hozzáállás annyira elfogadottá válik, hogy elhomályosítja a matematikának az egyszerű megfogalmazás elérésében való tökéletesen szabályszerű használatát.

Míg tehát Dirac annyira hisz a természet matematikai szépségében és gazdaságosságában, hogy időnként még a kísérleti eredményeket is felülbíráló vezérelvként hajlandó követni, Bridgman úgy érvel, hogy éppen az ilyen megtévesztő szirénhangok követésére való hajlandóságunk ingatja meg a természet eredendően matematikai jellegébe vetett hitet.

Einstein nézetében összefonódtak Bridgman és Dirac megfontolásai. Bridgmantól eltérően úgy vélte, hogy „a fizikus legfőbb feladata eljutni azokhoz az egyetemes elemi törvényekhez, amelyekből a kozmosz tisztán dedukcióval felépíthető". Felismerte, hogy még ha az ember operacionalista álláspontra helyezkedik is a fizikai törvények alkotását illetően, ezeket akkor is kizárólag a tapasztalatból ki nem hámozható, matematikai formába kell önteni. Ezen a ponton azt látjuk, hogy a fizikusnak van némi művészi szabadsága abban, hogyan mutatja be és fejleszti tovább elméletét.

Ha mármost igaz, hogy az elméleti fizika axiomatikus alapját nem lehet a tapasztalatból levezetni, hanem szabadon kell kitalálni, egyáltalán remélhető-e, hogy megtaláljuk a helyes utat? Sőt mi több: vajon a helyes

út nem csak képzeletünkben létezik-e? Egyáltalában remélhető-e, hogy a tapasztalat megbízható vezetőnk lesz, ha vannak olyan elméletek (például a klasszikus mechanika), amelyek a tapasztalattal messzemenő összhangban vannak, mégsem hatolnak a dolgok mélyére? A kérdésre teljes meggyőződéssel azt válaszolom, hogy szerintem létezik a helyes út, s rá is tudunk találni. Eddigi tapasztalatunk ugyanis feljogosít arra a bizalomra, hogy a természet az elképzelhető legegyszerűbb matematikai ideák megvalósulása. Meggyőződésem szerint tiszta matematikai konstrukcióval megtalálhatjuk azokat a fogalmakat és a köztük fennálló ama törvényi kapcsolatokat, amelyek a kezünkbe adják a természeti jelenségek megértésének kulcsát. A tapasztalat ugyan sugallhat alkalmas matematikai fogalmakat, ámde ezek semmi esetre sem vezethetők le belőle. A matematikai konstrukciók fizikai használhatóságának egyetlen kritériuma természetesen a tapasztalat. Az igazi teremtő elv azonban a matematikában rejlik. Bizonyos értelemben tehát igaznak tartom, hogy a valóság tiszta gondolkodással megérthető, úgy, ahogy arról a régiek álmodoztak.

(Nagy Imre fordításának felhasználásával)

Érdemes emlékeztetni Dirac arról tett megjegyzéseire, hogy bizonyos esetekben a kísérlet másodlagos szerepet játszik az elmélet mellett. Ezen nem pontosan azt értette, amire Eddington céloz a meglepő kísérleti eredmények túl gyors elfogadásától óvó, híres intelmében – „Ne higgy el semmilyen kísérleti eredményt, míg elméletileg nincs előrejelezve!"–, inkább arra gondolt, hogy az ember csodálatos, új matematikai modellt képzelhet el például az atommag működéséről, ám egy makacs fogyatékosságot találhat benne, ami miatt ellentmondásban áll valamilyen kísérlettel. Ekkor nem kell feltétlenül elveszíteni jó ötletünkbe vetett hitünket. Lehet, hogy az elméletből kimaradt egy viszonylag jelentéktelen (esetleg jelentékeny) alkotórész, ám ez a mulasztás a jövőben egyszerűen pótolható. Gyakran érhető tetten ez a megközelítés az elemi részecskék fizikájának elméleti kutatásában. E kutatási területen a spekulatív elmélet sokkal a kísérletek előtt halad a szükséges felszerelés bonyolultsága és rendkívül költséges volta miatt. A részecskékkel való bombázáshoz hatalmas energiára van szükség, az eredmények rögzítéséhez és értelmezéséhez pedig bonyolult számítógép-rendszerekre. Kísérleti adatok hiányában az elméleti tudós rábukkanhat egy gauge-elméletre (a 4. fejezetben tárgyalt fajtából), amelyet matematikai műveletek valamilyen csoportja határoz meg, és kidolgozhatja e teória egyes kísérleti következményeit. Néha az is előfordul, hogy a rejtvénynek szinte minden darabja a helyére kerül. Korábban egymástól független, véletlenszerű tényekre rendezett, egységes magyarázat adódik. Ám most meg valamilyen szörnyűséges, új következmény jelentkezik, amely nincs egyezésben a kísérletekkel. Ilyen helyzetben az elméleti tudós

figyelmen kívül is hagyhatja ezt a problémát, és tovább dolgozhat az elmélet sikerrel kecsegtető oldalain abban a reményben, hogy később, az elmélet általánosításakor a bosszantó ellentmondás majd megszüntethető. Ez gyakran jó stratégia, hiszen a vizsgált gauge-elméleteknek nem kell a mikroszkopikus világ mindent megmagyarázó elméleteiként működniük. Nem teljes leírásai ezek a természetnek, és az elméleti tudós szereti is azt hinni, hogy rossz előrejelzéseinek egyetlen oka jelenlegi befejezetlenségük. Amikor egy elméletet átfogóbbá tesznek, felszíni hibái jó eséllyel eltűnhetnek. Néha el is tűnnek. Újító szellemű tudósnak lenni részben azt jelenti, hogy az ember meg tudja különböztetni az éppen megalkotott egyszerű kiindulási modell ideiglenes hiányosságait a szóban forgó típushoz tartozó elméletek végzetes, belső hibáitól.

Dirac egy példát idéz Schrödinger tapasztalatából, azt az érvét alátámasztandó, hogy egy elmélet értékelésekor a formai szépségnek néha elsőbbséget kell adni a kísérleti adatokkal szemben:

> Hallottam Schrödingertől, hogy amikor egyenletének gondolata először fogant meg benne, hogyan alkalmazta azt azonnal a hidrogénatom elektronjára, és kapott a kísérleti adatokkal nem egyező eredményt. Az eltérés azért jelentkezett, mert akkoriban még nem volt ismeretes az a tény, hogy az elektronnak perdülete van. Schrödinger természetesen roppant csalódott volt, és hónapokra félretette a munkát. Azután rájött, hogy ha az elméletet megközelítő jelleggel alkalmazza, figyelmen kívül hagyva a relativitáselmélet megkövetelte finomságokat, ebben a durva megközelítésben munkája összhangban van a megfigyelésekkel.

Ez a történet váltotta ki Diracból sokat idézett kijelentését; így folytatja:

> Úgy vélem, ennek a történetnek van tanulsága, mégpedig az, hogy az egyenletek szépsége fontosabb annál, hogy illeszkednek-e a kísérleti eredményekhez. Ha Schrödinger jobban bízott volna saját munkájában, hónapokkal korábban közölhette volna, és pontosabb egyenletet tehetett volna közzé.

Van egy másik oka is annak, hogy néha elfogadjuk Diracnak a kísérlet másodlagos voltát hirdető nézetét: előfordulnak rossz kísérletek is! Érdekes felidézni néhány esetet, melyben a meglevő kísérleti bizonyítékok ellentétben álltak az elméleti tudósok előrejelzésével, ám az elméleti modellek elegancziájába vetett hit olyan erős volt, hogy az ellentmondó kísérleti bizonyítékot – helyesen – megbízhatatlannak ítélték.

Amikor Einsteinnek relativitáselméletének ellentmondó kísérleti bizonyítékról számoltak be, nyomban azt válaszolta, hogy a kísérleteknek kell

rossznak lenniük – és igaza volt. Később, amikor a világegyetem korának a csillagok fejlődése alapján becsült értéke nem egyezett a relativisztikus kozmológia által előrejelzett értékkel, ismét saját elméletének előrejelzése mellett állt ki, azon az alapon, hogy az biztosabb elméleti alapokon áll, mint a megfigyelési adatok értékeléséhez szükséges csillagfejlődési elmélet – és megint csak igaza volt.

A gyakorlat fölött aratott győzelmek utolsó példájaként (e példák csak azért említésre méltóak, mert vereség számtalan volt) Richard Feynman és Murray Gell-Mann 1958-ban közölt cikkét idézhetjük a gyenge kölcsönhatás szerkezetéről. Az elmélet annak felhasználásával épült, amit a két szerző egyiküknek egy bizonyos típusú egyenlet iránti „részrehajlásának" nevezett. Elméletük eredményei azonban ellentmondásban álltak a 6-os tömegszámú hélium bomlása során keletkező neutrinók megfigyelt eloszlásával. A szerzők azonban nem ijedtek meg. Ellenkezőleg, cikkükben a következőképpen írnak az ellentmondásról:

> Ezeket az elméleti érveket a szerzők elég erősnek tartják ahhoz, hogy indítványozzák: a hélium 6-os tömegszámú izotópjával végzett visszaverődési kísérlettel, valamint néhány más, kevésbé pontos kísérlettel fennálló ellentmondás azt jelzi, hogy ezek a kísérletek rosszak.

És feltételezésük, amint ez későbbi kísérletekből kiderült, valóban jogos volt.

A hibás kísérleti eredményeknek van még egy érdekes következménye, amely az utóbbi években a részecskefizika és a kozmológia határterületén vált nyilvánvalóvá. A világegyetem eredetének és fejlődésének ősrobbanás-elmélete szerint a világegyetemnek a távoli múltban forróbb, sűrűbb és zsúfoltabb helynek kellett lennie. Ahogy visszafelé haladunk a múltba, egyre emelkedő általános hőmérsékleteket találunk, és ilyen körülmények közepette a részecskék mind nagyobb és nagyobb energiával ütköznek egymáshoz. Röviden: korai szakaszaiban az egész világegyetem egyetlen, az ultranagy energiájú részecskék fizikája területén végzett hatalmas kísérlethez hasonlított. A kozmológusok és a részecskefizikusok ezért összefogtak a világegyetem korai történetének kutatásában. A részecskefizikus új környezetet lát, amelyről a legújabb elméleti eszméket és okoskodásokat felhasználó előrejelzéseket tehet. Ha ezek az eszmék olyan előrejelzésekhez vezetnek, melyek szerint a mai világegyetemnek nagyon furcsa tulajdonságokkal kellene rendelkeznie, amelyekkel nyilvánvalóan nem rendelkezik – például, hogy nem tartalmazhat galaxisokat –, akkor ezeket az új gondolatokat hamisnak ítélve elejthetjük. Hasonlóképpen, a kozmológus megvizsgálhatja a részecskefizikusok legújabb

elmeszüleményeit, hogy meglássa, azt eredményezik-e, hogy a világegyetem új elemi részecskéket tartalmaz, melyekkel betömhetik a világegyetem felépítéséről alkotott képünk hézagait. A részecskefizikusok és kozmológusok szoros együttműködése 1978-ban kezdődött el.

Körülbelül 1979 és 1983 között számos igen fontos kísérleti eredményt jelentettek be. Azt állították, hogy a neutrinónak kicsiny tömege van, s hogy különböző típusú neutrinók egymásba oda-vissza alakulhatnak; azt állították, hogy izolált mágneses töltést észleltek (az úgynevezett „mágneses monopólust", amelynek létezését Paul Dirac már sokkal korábban felvetette); azt állították, hogy elektromos töltésbeli aszimmetria hatását észlelték a neutronon belül, és voltak, akik azt bizonygatták, hogy protonbomlást láttak. E kísérletek mindegyike felfokozott elméleti érdeklődést váltott ki a kozmológia és asztrofizika általuk érintett területein. Számtalan népszerűsítő cikket és könyvet írtak e kísérletekről a nagyközönség számára, és az e kérdések megvitatására részecskefizikusokat és asztrofizikusokat egybegyűjtő konferenciák száma oly mértékben emelkedett, hogy az ember egész életét ilyen találkozókon vagy azokra utazva tölthette! Erre az érdeklődési robbanásra visszatekintve el kell mondanunk, hogy mindezeket az izgalmas kísérleti eredményeket már vagy visszavonták, vagy annyi kétség merült fel velük kapcsolatban, hogy az elméleti tudósok egyáltalán nem támaszkodnak rájuk. Ez a kiábrándító helyzet meglehetősen szokatlan, és magyarázatot érdemel. Az alapvető fontosságú kísérleteket általában gondosan, körültekintően végzik. A fent említett kísérletek mindegyike különleges volt, mert vagy véletlen megfigyelésen alapult, vagy pedig a kísérlet érzékenységi határán figyelt meg eseményeket, ott, ahol a valódi, mért eredmény már nehezen különíthető el a mérőműszer okozta zajtól. A megalapozatlan kísérleti állítások e gyűjteményével kapcsolatban az a legfigyelemreméltóbb, hogy mind a kozmológiában, mind a részecskefizikában sokkal jobban ösztönözték az új gondolatok elméleti körüljárását, mint a kifogástalan kísérletek!

Az antropikus elv

> Olyan, hogy filozófus, nem létezik; senki sem kívülálló; a megfigyelő, éppúgy, mint a megfigyelt, láncra van verve.
>
> E. M. Forster

A világegyetem történetében az ősrobbanás képe az a kitüntetett paradigma, amelynek keretein belül a kozmológusok azt próbálják megérteni, amit tu-

dunk, illetve azt, amit nem tudunk a minket körülvevő világegyetemről. De mi köze van mindennek önhöz és hozzám? Az emberi életnek a kozmikus tér és idő személytelen hátterébe való beillesztése fölött minden korban eltöprengtek a misztikusok, filozófusok, teológusok és tudósok. Megoldásaik a választási lehetőségek teljes skáláját lefedik. Az egyik véglet lehangoló materialista képet fest az emberi életről, mint helyi véletlenről, amelynek semmi köze sincs ahhoz, ahogy a világegyetem megváltoztathatatlanul menetel egy jövőbeli „nagy összeroppanás" pusztító hősége vagy a „hőhalál" örök feledése felé, míg a másik véglet az az antropocentrikus, teleologikus nézet, mely szerint a világegyetemet valamiféle gondviselő tervezés kimondottan az emberi élet számára készítette. Az utóbbi nézetet számos kultúra osztotta, népszerűségének csúcsát a XVIII. századbeli angol tudósok körében érte el. Sok biológus vélekedett így, míg a XIX. század közepén Charles Darwin és Alfred Russell Wallace fel nem ismerte a szervezetnek a környezetéhez való fejlődéstörténeti alkalmazkodását a természetes kiválasztódás útján. Azóta a biológusok elvetettek minden olyan elképzelést, amely így vagy úgy az evolúció céliránvossága mellett áll ki. Nem létezik semminemű nagy cél (az emberiség?), amely felé az egész evolúciós folyamat irányulna. Ha a környezet olyan szokatlan módon változna meg, hogy az intelligencia hátrányossá válna, akkor megszűnne a túlélést biztosító jó alkalmazkodottságunk, és bizony ugyanaz a pusztulás várhatna ránk, mint a dinoszauruszokra.

A „kiválasztási hatások" problémájából azt a tanulságot vontuk le, hogy tisztában kell lennünk mérőműszereink beépített hajlamával: bizonyos típusú bizonyítékokat másoknál könnyebben gyűjtenek be. Ha pusztán az emberi szem segítségével figyelnénk meg a világegyetemet, arra a következtetésre jutnánk, hogy a világegyetemben minden sugárzás az általunk „láthatónak" nevezett, vöröstől ibolyáig terjedő hullámhossztartományba esik. Vannak azonban más hullámhosszúságú sugárzások is, amelyeket az emberi szem nem képes érzékelni. A nagyobb hullámhosszú fénynek túl kicsiny az energiája ahhoz, hogy vétele nyomot hagyjon a retina hátsó felszínén lévő rodopszinmolekulákon, a láthatónál sokkal rövidebb hullámhosszúságú fény pedig olyan magas energiájú, hogy vétele tönkretenné a szemet. Emberi fiziológiánk körülhatárolja a segédeszközök nélkül megtehető csillagászati megfigyeléseink körét, következésképpen azt, hogy milyen csillagászati tudásra tehetett szert az ókori ember.

A szem korlátozott megfigyelési távolságát ma az ember szeménél sokkal nagyobb felbontású és hatótávolságú mesterséges „szemek" építésével ellensúlyozzuk. Ezek a hagyományos optikai távcsövek formáját követik, mint a Palomár hegyen felállítottak, illetve a rádióteleszkópok Jodrell Banksban és Arecibóban. E

berendezéseket ma már magasan Hawaii hegyei között elhelyezett infravörös távcsövek és a Föld körül műholdakon keringő röntgen-, infravörös és ultraibolya érzékelők egészítik ki. Emberi fiziológiánknak azonban meghatározóbb oldala is van, s ez nem győzhető le pusztán jobb távcsövek építésével.

Az ember bonyolult biokémiai számítógép. Nem csak ennyi, de ez a tovább nem csökkenthető, minimális leírás. Önsokszorozó, helikális DNS- (dezoxiribonukleinsav) molekulákból áll,* amelyek szén-, nitrogén-, foszfor- és oxigénatomokból épülnek fel. Nem tudjuk biztosan, hogyan keletkeztek ilyen bonyolult molekuláris szerkezetek a Földön. Lehetséges, hogy kezdetben véletlenszerű kölcsönhatások és mutációk révén jöttek létre a földtörténet korai szakaszában. Ha különböző időpontokban nagyszámú, különböző típusú bonyolult molekula keletkezett az ősóceánban, hihetőnek látszik, hogy ezek közül azok, amelyek más molekulákkal való kölcsönhatásaik révén képesek voltak másolatot készíteni magukról, gyorsan uralkodóvá váltak a populációban a szaporodni nem tudók rovására. De honnan ered az élőlények DNS-molekuláit felépítő szén, nitrogén, oxigén és foszfor? Ezt már sokkal biztosabban tudjuk: a csillagokból.

A hidrogénnél és a héliumnál nehezebb elemek atomjai nem keletkezhettek az ősrobbanás poklában. A világegyetem túl gyorsan tágul és hűl ahhoz, hogy a nehezebb atommagok nukleáris reakciókban létrejöhessenek. Az ősrobbanásnak nevezett természetes magreaktor leállította magát, miután a világegyetem körülbelül három percig tágult, ám ezalatt a rövid idő alatt a világegyetem tömegének 25%-át héliummá alakította, majdnem 75%-át pedig hidrogén formájában hagyta. Így mondom: „majdnem", mert a hidrogén héliummá alakulása után nyomokban deutérium, lítium és a hélium 3-as tömegszámú izotópja marad vissza, rendre 1/1000, 1/100 000 000 és 1/1000 tömegszázalék mennyiségben. E megjósolt mennyiségek pontosan megfelelnek a világegyetemben ma mérhető részarányoknak. Ez a figyelemreméltó megfigyelés az ősrobbanás kozmológiai elméletének egyik sarokköve.

Láttuk, hogy az „életnek" nevezett komplex jelenség az ősrobbanásból származó hidrogénnél és héliumnál nehezebb és bonyolultabb elemeken alapul. A legtöbb biokémikus úgy véli, hogy a szén – az az elem, amelyen saját szerves kémiánk alapul – a kémiai élet *spontán* kialakulásának egyedüli életképes alapja. A Föld élő rendszerei a szén bonyolult kémiai tulajdonságain, illetve a hidrogénnel, nitrogénnel, oxigénnel és foszforral alkotott vegyületein

*Ezenkívül ribonukleinsavból, fehérjékből, zsírokból és még sok-sok más vegyületből. – *A ford.*

alapulnak. Más elemek is fontos szerepet játszanak, de az élet játszmájában ez az öt játssza a főszerepet. Ahhoz, hogy az élet ezen öt építőkockája (valamint a szilícium, ha megjósoljuk a mai szilíciumtechnológiánkból kiinduló, mesterséges „élet" fejlődését) létrejöjjön, az ősrobbanásban keletkezett egyszerű atommagoknak évmilliárdokig magas hőmérsékleten kell főniük. A természet adta kemencék – a csillagok belseje. Az ősrobbanást túlélt hidrogén és hélium ott lassan a számunkra szükséges nehezebb elemekké ég el. Amikor a csillagok kimerítették nukleáris tüzelőanyag-készletüket, középpontjuk beomlik, és külső rétegeiket az űrbe lövellik. Ezek a végső vonaglások, amelyeket mi szupernovaként észlelünk, oszlatják szét a biológiai elemeket az űrben, ahol bolygókba, aszteroidákba és a csillagközi törmelék egyéb formáiba épülnek be. Végül eljutnak a mi testünkbe. A csillagok hamuja vagyunk.

Ezzel a csillagalkímiával kapcsolatban, amelytől az élet függ, az a legfontosabb tény, hogy mennyi ideig tart. Az alapvető fontosságú elemek, például a szén keletkezéséhez legalább tízmilliárd évnyi csillagégés szükséges. Ez az egyszerű tény teszi a világegyetem és tulajdonságai iránti vizsgálódásunkat egy hatalmas, mindent felölelő kiválasztási effektus, saját létezésünk foglyává. Vegyük példának a látható világegyetem *méretét*.

A világegyetem tágulásának és lassulási ütemének jelenlegi sebessége azt mutatja, hogy a tágulás kb. 13-18 milliárd évvel ezelőtt kezdődött. A tágulásnak ez az állapota azt jelenti, hogy a világegyetem mérete kibogozhatatlanul összefonódott annak korával. A látható világegyetem mérete ma azért nagyobb 13 milliárd fényévnél, mert életkora több 13 milliárd évnél. Egy olyan világegyetem, mely csak egyetlen, a mi Tejútrendszerünkhöz hasonló galaxist tartalmaz, 100 milliárd csillagával, talán mindegyik körül bolygórendszerekkel, a világegyetemi építőipar számára ésszerűen takarékosnak látszhat. Ám egy ilyen világegyetem, mely a mienknél több mint 100 milliárddal kevesebb galaxist tartalmaz, csak alig több mint néhány hónapja tágulhatott volna. Sem csillagok, sem biológiai elemek nem jöhettek volna létre benne. Nem tartalmazhat csillagászokat sem. Nem szabad meglepődnünk azon, hogy a világegyetem olyan hihetetlenül nagy léptékű, mert nem is jöhettünk volna létre olyanban, amely jelentősen kisebb. S e felismerésnek, hogy a világegyetem néhány kulcsfontosságú szerkezeti vonása a megfigyelők létezésének szükséges előfeltétele, sok tekintetben befolyásolnia kell nézeteinket. Számos filozófus érvelt az emberi élet végső jelentősége ellen azon az alapon, hogy az ismert világegyetemnek csak elenyésző részét tölti be. Egyes mai csillagászok a világegyetem óriási méretéből arra következtetnek, hogy galaxisunkban valószínűleg nyüzsögnek az intelligens élőlények, akikkel felvehetnénk a kapcsolatot. Ám a világegyetemnek olyan nagynak kell lennie, mint amilyen,

hogy az életnek akár csak egyetlen magányos szigetét is fenntarthassa. Kijózanító gondolat, hogy a világegyetem globális – és lehetséges módon végtelen – szerkezete így kapcsolódik az élet kialakulásához a Föld bolygón.

Azt a felismerést, hogy vannak olyan típusú világegyetemek, melyeket eleve lehetetlen volna megfigyelnünk, gyakran *gyenge antropikus elvnek* nevezik. Alapvetően ugyanannak az óvatosságnak a kiterjesztése ez, amely a kísérleti tudományok gyakorlatában a mérőműszereinkbe beépített előítéleteink teljes megértését is megköveteli. Arra tanít, hogy a világegyetemnek számunkra eleve szokatlannak tetsző tulajdonságai felett érzett megütközésünket enyhítse annak felismerése, hogy ezek közül soknak egyszerűen így kell lennie ahhoz, hogy a világegyetemet intelligens megfigyelők tanulmányozhassák.

A kozmológusok a gyenge antropikus elvet úgy tekintik, mint Kopernikusz híres bírálatának pontosítását, hiszen annak bejelentésével, hogy nem a Föld, hanem a Nap a Naprendszer középpontja (amely a XIX. század előtti csillagászat számára egyenlő volt az egész világegyetemmel), megszüntette azt a sok évszázadon át elfogadott előítéletet, hogy a fizikai világegyetem középpontja az emberiség. Vigyázzunk, nehogy összetévesszük Kopernikusz fontos tanítását, mely szerint a világegyetemben elfoglalt helyünket nem szabad *minden* szempontból különlegesnek tartanunk, azzal a helytelen meggyőződéssel, mely szerint a világegyetemben elfoglalt helyünk ezért *semmilyen* értelemben nem lehet különleges. Nem létezhetnénk egy csillag belsejében; nem létezhetnénk, ha a világegyetem egymillió évesnél fiatalabb volna. Ha a világegyetemnek tényleg volna közepe (erre semmilyen bizonyíték nincs), és az élet kifejlődését és folyamatos fennmaradását elősegítő feltételek csak e középpont közelében lennének meg, akkor nem csodálkozhatnánk azon, ha ráeszmélnénk: ott élünk.

Úgy látszik, hogy a világegyetem és annak megfigyelői közti szimbiotikus kapcsolat más, titokzatosabb, lenyűgöző, de objektív módon nehezen értékelhető vonásokat is mutat. Einstein általános relativitáselméletének sikere világegyetemünk múltjának és jelenének leírásában, annak rendkívül szabályos tágulásával, alacsony sűrűségével, csillag- és galaxishalmazaival a kozmológusokat arra indította, hogy tanulmányozzák az Einstein egyenleteivel leírható más típusú világegyetemeket is. Minél többet foglalkozunk a fizika törvényei által megengedett más típusú világegyetemekkel, annál különlegesebbnek és szokatlanabbnak látszanak tényleges világegyetemünk tulajdonságai. Egyedülálló voltát legerőteljesebben az a tény húzza alá, hogy láthatólag annyi más alternatívát képzelhetünk el. A 4. fejezetben már megtárgyaltuk, vajon a világegyetem egyedülálló voltának tükrében az elméleti lehetőségek bősége mond-e valamit a világegyetemek megengedett kezdeti feltételeiről, vagy a fejlődésüket vélhetően irányító törvényekről.

Szemléltetésül emeljük ki a világegyetemnek néhány megmagyarázatlan, nagy léptékű tulajdonságát. Láttuk már, miért szükségszerű, hogy olyan nagy és olyan régi. Azt is láthatjuk, miért valószínűtlen, hogy lesz még emberiség akkor, amikor tízszer ekkora és tízszer idősebb lesz: addigra minden csillag elpusztul, és saját bolygónk erőforrásai nem tudnak fenntartani minket. Lehet, hogy addigra elég találékonyak leszünk ahhoz, hogy máshol és más módon éljünk tovább, de folyamatos fennmaradásunk kevésbé lesz valószínű, mint ma, amikor a Nap nukleáris életének teljében ragyog. De mi van a galaxisokkal? Nem tudjuk biztosan, hogyan keletkeznek a galaxisok, de ismerjük a galaxisokhoz hasonló struktúrák kialakulásához vezető, alapvető fizikai folyamatot. Ha egy halom részecske vonzóerőt gyakorol egymásra, akkor – hacsak nem *teljesen* egyenletes az eloszlásuk – az idő múlásával hajlamosak csomókba rendeződni, nem egyenletes eloszlást felvenni. A világegyetem viszonylatában a részecskék az ősrobbanásból kikerülő atomok és anyagszemcsék, a vonzóerő pedig a gravitáció. Az eredmény egy gravitációs-aggregációs folyamat, amelynek következtében a tér sűrűbb részei a ritkábbak rovására még sűrűbbé válnak. E szükségszerű folyamat hatására a világegyetem, amely nem tökéletesen egyenletes – nem is lehet, tekintettel a benne lévő elemi részecskék helyzetében mutatkozó, elkerülhetetlen kvantumbizonytalanságra –, több milliárd év alatt megközelítő egyenletességéből és szerkezetnélküliségéből olyan állapotba jut, amelyben a sűrű szigetekbe tömörült anyag alacsonyabb sűrűségű gáz és por tengerében van szétszórva. Az anyag csak ezekben a sűrű szigetekben – amelyeket a galaxisokkal azonosítunk – érheti el a csillagok képződéséhez szükséges sűrűséget. Ennyit már értünk, bár a későbbi szakaszokat még nem: a kozmosz anyagának egyes sűrű szigetei miért csavarodnak fel spirális galaxisokhoz hasonló alakban, míg mások keringő csillagokból álló, hatalmas ellipszoiddá alakulnak, amelyeket elliptikus galaxisoknak nevezünk. Bár tudjuk, időben hogyan alakulnak az aggregáció folyamatainak korai szakaszai, egy fontos elem hiányzik a képből. Milyen fokú volt a kezdeti szabálytalanság? Csak az erre a kérdésre adott válasz ismeretében tudjuk majd eldönteni, helyes-e a galaxisok létezésére adott magyarázatunk. Azt azonban elmondhatjuk erről a kiinduló értékről, hogy szigorú határok között kell mozognia ahhoz, hogy a galaxisok idejében létrejöjjenek. Ha ez az érték kevéssel az optimális fölé emelkedik, máris túl hamar keletkeznek sűrű szigetek, és a gravitációs erő hatására hatalmas fekete lyukakat alkotva katasztrofálisan összeomlanak, még mielőtt a csillagok felragyoghatnának. Az optimálistól kissé elmaradó érték olyan anyag-szigeteket eredményez, amelyek túl lazák ahhoz, hogy valaha is galaxisokká sűrűsödjenek: sohasem képződnek csillagok. Egyik esetben sem látszik különösebben valószínűnek, hogy spontán

módon kialakulhatna az élet. Hasonlóképpen, az ősrobbanásból kiáramló anyag és sugárzás relatív koncentrációját is egy szűk tartományba eső tényleges érték jellemzi, mely lehetővé teszi a mi fogalmaink szerinti élet kifejlődését. A kezdetben gyorsan táguló világegyetem elméletének egyik célja az, hogy ezekre a kis szabálytalanságokra magyarázatot adjon. Ez az elmélet képes arra, hogy megjósolja az egyöntetűség hiányának várható mértékét a világegyetemben. Sajnos, mindeddig az elmélet alaptípusaiból kapott értékek túlontúl magasak, hacsak nem tételezünk fel rendkívül különleges tulajdonságú anyagmezőket a kezdeti világegyetemben, ám mivel e tulajdonságokra a kozmikus inhomogenitási szint „helyes" értékének beállításán kívül nincs más indok, ez a megoldás nem túl vonzó.

Még ha a tágulás választ ad is a világegyetem inhomogenitási szintjének kérdésére, akkor is megköveteli az antropikus elv alkalmazását. Emlékszünk, hogy a felfúvódási tágulás lényege az, hogy a tágulás legkorábbi szakaszában a világegyetem minden kis mikroszkopikus területe felgyorsult tágulási folyamaton mehet keresztül. A ma látható teljes világegyetem ezért egyetlen ősi kvantumfluktuáció idején fennálló körülményeket tükrözhet. A kezdeti világegyetemnek azonban a tágulás bekövetkeztekor sok (ha a világegyetem végtelen, akkor végtelen számú) mikroszkopikus része van. Mindegyik a benne uralkodó helyi körülmények meghatározta mértékben tágul. Az eredmény olyan világegyetem, mely különböző méretű buborékokból álló habhoz hasonlít. Egyes részek sokat tágulnak, mások csak keveset. Az előrejelzés és cáfolat szokásos tudományos módszere itt semmilyen módon nem alkalmazható. Történeti kérdés, hogy e buborékok egyikében élünk-e, és a történelem a meg nem ismétlődő dolgok tudománya. Ha a tágulás megtörtént, akkor egy kitágult buborék belsejében kell lennünk, mely már legalább 10-15 milliárd fényévnyit tágult. Látható világegyetemünk láthatára mögött más, megjósolhatatlan méretű buborékok léteznek.

Véletlen egybeesések

> Bár nagyon sokat beszélünk a véletlenről, igazából nem hiszünk benne. Szívünk mélyén többre tartjuk a világegyetemet, titkos meggyőződésünk, hogy nem lehet afféle rendetlen, esetleges ügylet, hisszük, hogy minden egyes elemének értelme van.
>
> J. B. Priestley

A gyenge antropikus elvet nem szabad cáfolható elméletnek vagy tételnek tekinteni. Olyan módszertani elv, amelyet saját felelősségére utasít el az ember.

Volt már rá példa, hogy felismerésének hiánya fölösleges spekulációkra, sőt teljesen fölösleges új gravitációs elméletek kidolgozására ösztökélte a kozmológusokat. Idézzük most fel a legkirívóbb példát, mert ez indította Robert Dicke-t 1957-ben a gyenge antropikus elv első nyílt kozmológiai megfogalmazására.

Az 1930-as években (történetesen éppen a nászútján) Paul Dirac sajátos egybeesésre hívta fel a figyelmet a természetben: arra, hogy a megfigyelhető világegyetemben a részecskék száma megközelítőleg 10^{78}, míg a két proton között ható elektromágneses és gravitációs erők aránya 10^{39}-hez közeli érték. Már az is elég furcsa, hogy ezek a számok ilyen óriásiak, ám az a tény, hogy egyik a másiknak a négyzete, arra utal, hogy nem teljesen függetlenek egymástól, talán egy ilyen egyenlet szerint viszonyulnak egymáshoz:

$$(\text{Az elektromos és gravitációs erők aránya})^2 = \text{Az atomok száma a megfigyelhető világegyetemben.} \qquad (7.1)$$

Annak indítványozása azonban, hogy az első arány ténylegesen *egyenlő* az utóbbi értékkel (ahogy $10^{78} = 10^{39} \times 10^{39}$), dilemmához vezet: az elektromos és gravitációs erő belső erősségét *természeti állandók* határozzák meg (az elektron töltése, a proton tömege és a Newton-féle gravitációs állandó), és ezek értékéről azt tartjuk, hogy mindenütt és mindenkor ugyanaz. Ezzel ellentétben a *megfigyelhető* világegyetemben a részecskék száma folyamatosan emelkedik. Távcsöveinket minden pillanatban új fénysugarak érik el, amelyek tőlünk hatalmas távolságban indultak útnak. Olyan tárgyakat, melyek messzebbre vannak tőlünk, mint a fénysebesség megszorozva azzal az idővel, amióta a világegyetem tágul, még nem láttunk. Tőlünk körülbelül 15 milliárd fényévnyire fekvő, gömb alakú látóhatárral vagyunk körülvéve, amely elválasztja a világegyetem megfigyelhető részét (ami rajta belül esik) a látóhatáron kívül eső, eddig még meg nem figyelt részétől. Ahogy azonban telik az idő, egyre messzebbre látunk, és az atomok vagy részecskék száma a látható világegyetemben folyamatosan nő, a világegyetem korával egyenes arányban. Dirac egyenlősége (7.1) egyedül akkor lehet érvényes, ha vagy az elektromágneses, vagy a gravitációs erő erőssége az időben változik.

Mindkét felvetés rendkívül szélsőséges. Dirac felvetése szerint a gravitáció belső ereje gyengül a világegyetem korával fordított arányban. Ez az elképzelés később hatalmas mennyiségű elméleti és kísérleti fizikai eredmény létrejöttéhez vezetett, ahogy a matematikusok kimutatták, hogyan változtatható meg Einstein gravitációs elmélete úgy, hogy ezt a tulajdonságot is magában foglalja,

és különféle kísérleteket módoltak ki annak ellenőrzésére, változik-e a gravitáció erőssége a világegyetem öregedésével. A mai napig nincs bizonyíték arra, hogy a gravitáció az idő függvényében gyengül. A Marsra küldött Viking űrexpedícióknak köszönhetően tudjuk, hogy ha a gravitáció az időben gyengül, akkor sem változhatott többel, mint egy százalékkal a világegyetem teljes, 15 milliárd éves története alatt. Ez százszor kevesebb, mint a Dirac által megjósolt változás.

A történet érdekessége az, hogy 1964-ben Robert Dicke, egy Princetonban dolgozó amerikai fizikus felhívta a figyelmet arra, hogy valójában saját létünk függ a Dirac kimutatta egybeeséstől a gravitáció és az elektromágneses erő relatív erősségének négyzete és a ma látható világegyetemben található részecskék száma között. Ennek az egybeesésnek az az üzenete, hogy nem vagyunk messze attól az időponttól, amikor a csillagok héliummá kezdték égetni hidrogénjüket. Megfigyelők csak akkor tűnhetnek fel, amikor a világegyetem már kellőképpen megöregedett ahhoz, hogy a Dirac-féle egybeesés érvényes legyen. Azokban a világegyetemekben, amelyek nem mutatják a Dirac-féle összefüggést, nem valószínű a megfigyelők megjelenése. Ez egy antropikus kiválasztási hatás, melynek magyarázatához nincs szükség a gravitációs erő változásának segítségül hívására.

A spekulatív antropikus elv

> Két olyan alkalom adódik az ember életében, amikor nem szabad töprengenie: amikor nem engedheti meg magának, és amikor igen.
>
> Mark Twain

Az előzőekben tárgyalt érvelés stílusa eléggé meglepő, és sok kozmológust még vadabb képzelgésre serkentett. Tegyük fel – mondták –, hogy végtelen számú lehetséges világegyetem létezik, minden lehető méretben, korban, hőmérséklettel, alakkal és tartalommal. Sőt képzeljük el, hogy a gravitáció és az elektromágneses erő értékei mindegyikben különböző kombinációkat mutatnak. Mekkora ez esetben azoknak a lehetséges világegyetemeknek száma, amelyekben megfigyelők jelenhetnek meg? Bizonyos értelemben nagyon kicsinek látszik. Ha elképzeljük, hogy a természet alapvető erői a jelenlegitől kissé eltérő értékűek, lehetetlenné válik a kémia: nincsenek csillagok, sem szénvegyületek, és nyilván megfigyelők sem. Úgy látszik tehát, hogy az *általunk* elképzelhető összes világegyetem közül csak igen kevésben lehetséges

élet. A legtöbb halva született: képtelen az élet alapvető építőkockáit előállítani vagy olyan környezetet biztosítani, melyben a természetes kiválasztódás általi evolúció a megszokottól eltérő eredményekkel járhat.

Jelenleg nehéz eldönteni, mit kezdhetünk ezzel az érveléssel. Lehet, hogy igaz: a világegyetem más milyen is lehetett volna. Lehet, hogy nem igaz. Ha igaz az, hogy mindenféle szerkezetű világegyetem létezhet, és az életet fenntartani képes világegyetemek száma rendkívül alacsony, akkor nem szükséges további magyarázatokat keresni a világegyetem számos megfigyelt tulajdonságára. Sőt, ha a világegyetem térbeli kiterjedése végtelenül nagy (a legutóbbi megfigyelések ezt a nézetet támasztják alá), és kezdeti feltételei véletlenszerűek, akkor a kiindulási feltételek e véletlenszerűen végtelen halmazában valahol léteznie kell végtelen számú térrésznek, amelyek olyanfajta, egyöntetűen és izotropikusan táguló látható világokká tágulnak, mint amelyet jelenleg a megfigyelhető világegyetemnek nevezünk. Ebben a helyzetben nincs mélyebb magyarázat annak *megfigyelt,* nagy léptékű tulajdonságaira. S ez meglehetősen visszataszító dolog a tudós számára, akinek célja az általunk látható világegyetem bonyolultságának magyarázata kisszámú, mindent felölelő természeti törvény segítségével. Lehet, hogy létezik ilyen „egyszerű" megoldás, de az is lehet, hogy nem. Az is lehet, hogy egy végtelen és véletlenszerű világegyetemnek egyik lakható szegletében élünk, melynek kezdeti állapota semmilyen természeti törvénynek nem engedelmeskedett.

Az élet és a megfigyelők

> Mindig meglepődöm, amikor egy fiatalember azt mondja: kozmológiával akar foglalkozni. A kozmológia szerintem nem választás kérdése, ez egyszerűen megtörténik az emberrel.
>
> W. H. McCrea

Ha előszámláljuk a körülményeknek azt az egyvelegét, amelyre szükség van ahhoz, hogy a világegyetemben bármilyen kémiai élet is kialakuljon, azt látjuk, hogy nagyszámú, rendkívül finoman kiegyensúlyozott „véletlennek" kell egyszerre teljesülnie ahhoz, hogy a világegyetem megfigyelőknek adjon életet. Ha egész sor hipotetikus „más világegyetemet" képzelünk el, melyekben a mi világegyetemünk szerkezetét meghatározó mennyiségek rendre felveszik az értékek minden lehetséges kombinációját, azt találjuk, hogy majdnem mindegyik papíron alkotott világegyetem meddő, képtelen a kémiai bonyolultságnak azt a fajtáját létrehozni, amelyet „életnek" nevezünk. Ez a felfedezés

vezette Brandon Cartert arra, hogy feltegye: a világegyetemnek talán van egy elvontabb, metafizikai oldala is, s ezt a gondolatot erős antropikus elvnek nevezte el, megkülönböztetendő a fent tárgyalt, ellentmondásmentes, gyenge antropikus elvtől. Az erős antropikus elv azt veti fel, hogy mivel olyan nagyszámú figyelemreméltó és látszólag egymástól független „véletlen" látszik közrejátszani abban, hogy az élet lehetővé váljék a világegyetemben, a világegyetemnek megfigyelőket *kell* létrehoznia történelmének valamelyik szakaszában.

Na már most ez meglehetősen furcsán hangzik. A kozmológusok „más világegyetemekről" beszélnek. Hol vannak ezek? Miképpen lehet azt állítani, hogy a mi világegyetemünk alkalmasabb az élet fejlődésére, mint egy másik? Az „életről" és a „megfigyelőkről" is úgy beszélünk, mintha szerepet játszanának a fizikában. Hogyan lehetséges ez? A válasz keresése során a mai fizika meglepő irányokat jelöl ki.

A világegyetem kezdetét illetően a kozmológusok két választási lehetőséget vesznek komolyan fontolóra. Az elmúlt húsz év során hol az egyik, hol a másik volt általánosabban elfogadott. Az egyik lehetőség az, hogy logikailag csak egyféle világegyetem lehetséges. Ebben az esetben az alapvető természeti állandók jelenleg megmagyarázatlan értéke semmilyen értelemben nem önkényes. Egyetlen „minden létező elmélete" fog kibontakozni, és a tudományos kutatásnak ez az ága akkor kiteljesedik. Az elméleti fizikusok körében azért váltottak ki felfokozott izgalmat a „szuperstring"-ek, mert ez a gondolat vezet el a „minden létező elméletének" első változatához. A második lehetőség az, hogy mind a világegyetem szerkezetében, mind pedig az alapvető természeti állandókban vannak véletlen elemek. Ez a véletlenszerűség különböző formákban jelentkezhet. A világegyetem egészének összetétele számottevően ingadozhat helyről helyre. Ha a természeti állandók valamilyen szimmetria megsértéséből erednek, akkor ez különböző helyeken különböző módon történhetett meg, sőt a világegyetemben másutt még ma is különböző lehet. Elképzelhető, hogy a kezdeti gyors tágulás jelensége biztosította azt, hogy a természeti állandók csak azon a koordinált, ősi körzeten belül hasonlóak, amely a mi látható világegyetemünkké tágult.

A második forgatókönyvnek az a tanulsága, hogy a világegyetem másmilyen is lehetett volna. Bizonyos értelemben egy mélyebb, ám jelenleg részben rejtett szimmetriának egyik tényleges aszimmetrikus megnyilvánulása. A természeti törvények szimmetriája azért rejtett, mert sajátos működésük szükséges ahhoz, hogy fennálljon.

Ha a világegyetemet egyértelműen egy magasabb belső logika írja elő, rendkívül szerencsésnek kell tartanunk magunkat, hogy a dolgoknak ez az egy-

értelmű, önmagában ellentmondásmentes elrendeződése éppen lehetővé tette a megfigyelők megjelenését, és semmilyen további következtetést nem vonhatunk le az élet és a világegyetem kapcsolatáról anélkül, hogy metafizikai vagy vallásos hithez ne folyamodnánk. Ha a világegyetem felépítésének véletlenszerű oldala is van, akkor más a helyzet. El kell fogadnunk, hogy sok tudós előítéletével ellentétben a világegyetem nagy léptékű szerkezetének vannak olyan elemei, melyekre nincs hagyományos értelemben vett magyarázat. Ezek a világegyetem történetének első pillanataiban, véletlenszerű eseményként jöttek létre. Másképpen is történhettek volna (sőt, máshol a világegyetemben most is másképpen *lehetnek*). A lehetséges világegyetemek zömében, ahol e véletlenszerű események kimenetele olyan körülményekhez vezet, melyek között az élet nem lehetséges, mi nem is létezhetnénk.

De ez még mindig nem teszi szükségessé a megfigyelőket a világegyetem létezéséhez, csupán a megfigyeléséhez. Élettől mentes világegyetemet is el lehet képzelni. Magányos helynek látszik – talán értelmetlennek –, de logikailag semmiképpen sem lehetetlen és fizikailag nem ellentmondásos. Vagy mégis?

A mai fizika legnagyobb eredménye a kvantumelmélet kifejlesztése és használata volt. A fizikának ezen az ágán nyugszik mindennapi létünk. Olyan jól értjük működését, hogy lézerek, tranzisztorok, mikroáramkörök és számítógépek készítésére használjuk, egész technikai társadalmunk ezer és ezer különféle módon épül rá erre az elméletre. Ám ez a teljesen gyakorlatias tudomány, amely lehetővé teszi, hogy elképesztő részletességgel megértsük az anyag szerkezetét, és amely a természetben fellelhető minden atom és a testünkben lévő minden DNS-spirál viselkedését irányítja, alapjaiban mély titkot rejt. A 3. fejezetben láttuk, hogy szabványos alakjában, amelyet Niels Bohr fogalmazott meg a háború előtt, azt állítja, hogy a jelenségek csak akkor kezdenek el létezni, amikor megfigyelik őket. Amikor pedig már tart a megfigyelés, akkor a látott állapot előre megjósolhatatlan módon a megfigyelés aktusától függ. Határozottan csak annyit lehet megjósolni róla, hogy az állapot megfigyelésekor mekkora valamelyik tényleges mérés feljegyzésének valószínűsége.

Bohr szerint a természeti jelenségek egyedül valóságos tulajdonságai a megfigyelt jelenségek. Többé nem tartható fenn az a régi descartes-i nézet, mely szerint a természetet tökéletes rejtekhelyről figyelhetjük meg, mondjuk, egy ornitológus módjára. Megszakíthatatlan kapcsolat van a megfigyelő és a megfigyelt dolog között. John A. Wheeler, a kiemelkedő amerikai fizikus, aki hosszú ideig Bohr munkatársa volt, felvetette, hogy a kvantummechanikának ez az értelmezése szó szerint véve azt jelenti, hogy a kvantumvilág megszületéséhez, „létrehozásához" „megfigyelőkre" van szükség. A kvantumelméletnek Bohr szerinti, szélsőséges értelmében tehát a távoli csillagok és galaxisok

kvantumrealitása addig nem szavatolható, amíg valaki „meg nem figyeli" őket. Wheeler szavaival: „Lehet, hogy a világegyetem megszületéséhez megfigyelőkre van szükség."

Még mindig nem értjük teljesen, milyen tulajdonságokkal kell rendelkeznie a „megfigyelőnek" a kvantumfizikában. Egyesek szerint bármilyen információtároló eszköz megfelelő lehet, ám mások, jelesül a Nobel-díjas Wigner Jenő, úgy vélték, hogy önvizsgálatra képes emberi tudatra van szükség.

Bohr különös módon értelmezi a kvantumfizikát, a gyakorlati fizikusok azonban ezt az értelmezést pragmatikusan a magukévá teszik, és nem foglalkoznak azzal, hogyan működik. Az ilyen finomságok nem befolyásolják az elmélet gyakorlati, laboratóriumi használatát. Az utóbbi években azonban a kozmológusok fontolgatni kezdték, hogy mi volna akkor, ha a kvantumelméletet a világegyetem egészére alkalmaznák, azaz megpróbálták számbavenni a kvantumkozmológia következményeit. Egy efféle program azonnal zsákutcába jut, ahonnan csak úgy szabadulhatunk, ha megbirkózunk a kvantummegfigyelés jelentésével. Ha csak annak tulajdonítunk valóságot, ami megfigyelés alatt áll, ki figyeli meg a világegyetemet? Ha csak arról fogalmazhatunk meg állításokat, hogy milyen valószínűséggel figyelhetjük meg a világegyetemet éppen egy adott állapotban, mi értelme van ennek, ha csak egyetlen világegyetem létezik? A kvantumvalóság „sok világ"-értelmezése azt állítja, hogy minden alkalommal, amikor megfigyelés történik, a megfigyelő vagy a világ két állapotra hasad – egy-egy állapotra, a megfigyelés két lehetséges kimenetelének megfelelően. A világegyetem eszerint különböző világok egyre sokasodó halmazát létrehozó, egymást követő hasadások révén fejlődik, ahol minden, ami logikusan megtörténhet, előbb vagy utóbb meg is történik. A kvantummérés véletlenszerű volta, amit Bohr a megfigyelő és a megfigyelt dolog egymástól elválaszthatatlan, belső tulajdonságának tartott, nem más, mint illúzió, amit az okoz, hogy a hasadó világok hálózatából mindössze egy ösvényt járunk végig. A kvantumkozmológusok azért fogadják el a kvantumvalóságnak ezt az értelmezését, mert nem írja elő, hogy a világegyetemnek megfigyelés alatt kell állnia. Az általunk tapasztalt és megfigyelt világegyetemen kívül más világegyetemeket is ugyanúgy valóságosnak tart. Nem tulajdonít különleges jelentőséget az életnek kvantumszinten, ám létezniük kell olyan elágazásoknak, amelyek mentén kialakul az élet, hiszen az Everett-féle világok különböző ágai a természeti törvények minden lehetséges eredményét feltárják. A világegyetemek e sora azzal a képpel egyenértékű, amelyben véletlenszerű tulajdonságok vesznek részt a mi egyetlen világegyetemünk felépítésében, bár itt nem a lehetőség, hanem a valószínűségi eloszlás valósul meg.

Még nem tudjuk, vajon Bohrnak vagy Everettnek volt-e igaza a kvantummechanika értelmét illetően. Bármi legyen is a kvantumvalóság rejtvényének megfejtése, a megfigyelők világegyetemben játszott szerepének és jelentésének a helyes felmérésével meg kell várnunk a kozmosz és a kvantum ütköztetésének kimenetelét. Ezeknek az össze nem illő feleknek az összeházasítása szembesíti majd a kozmológusokat a világegyetem eredetének kérdésével, egy olyan rejtéllyel, melyben mi magunk is titokzatos és szokatlan szerepet játszunk.

Isten léte mellett szóló érv-e az antropikus elv?

> Adj nékünk hatalmat, ó Urunk, mert ha nem adsz nékünk hatalmat, mi sem hirdetjük dicsőségedet, és, ó Urunk, kinek lesz ez jó?
>
> Régi imádság

A történelem tanúsága szerint a legtöbb régi kultúra, akár keleti, akár nyugati, ösztönös, mély hittel hitte, hogy a természetet jóakaratú Isten vagy istenek gondviselése tervezte az ember számára. A természet szépsége, erőforrásainak bősége, a nap és éjszaka, a nyár és tél, a vetés és aratás idejének visszatérése ékesen bizonyítani látszott ezt a feltételezést. Nem kivétel az Ótestamentum sem, amely oly nagymértékben formálta kulturális és tudományos örökségünket. Az Ószövetség a zsidóknak a természetről vallott kezdeti nézeteit alakította és tükrözi. Egy hitbuzgó zsidónak természetesen sohasem jutott volna eszébe, hogy a természetet Isten létének bizonyítására kellene használnia. Az Ő létezéséhez nem fért kétség. A természet olyasmi volt, amit ünnepelni kellett és részt venni benne. Azonkívül fölöttébb világi dolog volt. Természeti istenek nem léteztek. Bár az alapvető hit és meggyőződés a teleológiában gyökerezett, nem volt mindig gyerekes módon antropocentrikus, amint ezt Jób könyve érzékletesen szemlélteti. Később Arisztotelész görög eszméi kerültek előtérbe az európai filozófiai gondolkodásban. Arisztotelész nyomatékosan hangsúlyozta a dolgok célját, mint igazi értelmüket és jelentőségüket felfedő vonásukat. Amellett, hogy „hogyan" történnek a dolgok, főként az érdekelte, hogy „miért". Az arisztotelészi nézetek összeolvadtak a zsidó-keresztény hagyománnyal, és számos olyan érvelésben felbukkantak, amellyel Isten létét kívánták bizonyítani a természetben megfigyelhető látszólagos „tervezéssel". Később Kopernikusz, Galilei, Newton és társaik azzal változtatták meg forradalmi módon a tudomány módszerét és fő hangsúlyát, hogy a tudomány céljául a „hogyan", nem pedig a „miért" kérdés megválaszolását tűzték ki. Azt gondolhatnánk, hogy ezzel végérvényesen leszerepeltek

az Isten létét a világ látszólagos életfenntartó céljából levezető érvelések. Ám ez egyáltalán nem így van. A természeti törvények fölöttébb látványos kibontakozása, ami Newton hatalmas művében érte el csúcspontját, csak hangsúlyeltolódást eredményezett. Egyes események helyett maguknak a természeti törvényeknek az aprólékos matematikai pontossága vált az Istenség létének bizonyítékává. Emellett megmaradt az a fogyatékosabb érvelés is, amely az ember és az állatok fiziológiájának és a környezetükben való fennmaradáshoz szabott szükségleteiknek az összeillését a természet gondviselő megtervezése bizonyítékának tekinti. Ezt az utóbbi nézetet ingatta meg alapjaiban Darwin elmélete a természetes kiválasztódásról. Ám – ahogy abban az időben széles körben felismerték – a darwini forradalomnak nem volt semmi mondanivalója a másik típusú Newton-féle tervezői elvről, amely a változatlan természeti törvények matematikai harmóniáján alapul.

Egyesek még ma is ellenállhatatlan kísértést éreznek arra, hogy messzemenő metafizikai következtetést vonjanak le abból a tényből, hogy a fizikai világegyetem felépítésében egész sor, létezésünket együttesen lehetővé tevő véletlenszerű egybeesést találtunk. Nem bizonyíték-e ez Isten létére, aki a halandó emberre gondolva teremtette a világegyetemet? – kérdezik. A „természetes teológia" – ezen a néven vált ismertté – módszeres kutatásként a középkorban kezdődött, csúcspontját azonban a XVII. századi angol tudósok körében érte el, akik a newtoni forradalom sikereinek hevében vallásos hitük szempontjából próbálták megérteni az eléjük táruló rendet. A természeti törvények óraműszerű pontosságát és szabályosságát közvetlen bizonyítéknak tartották a világegyetem mögött álló Nagy Tervező létére, akit a teológusok Istenével azonosítottak. Az akkori protestáns teológia főárama magába olvasztotta ezeket az eszméket, amelyek ékesen fejeződnek ki az újonnan felfedezett természeti törvények fölötti elmélkedés ihlette, jól ismert egyházi ének soraiban: „e törvények soha meg nem dőlnek, /mert utat mutatni Ő alkotta őket." Newton valóban elégedett volt eszméinek ilyen irányú felhasználásával. A *Principia* bevezetésében megjegyzi, hogy megírásakor gondolt az Istenségben való hit mellett szóló érvekre. Richard Bentleynek pedig igen talányos módon azt írja: „ van ugyan még egy másik Isten-érv is, melyet igen erősnek tartok, amíg azonban a megalapozásául szolgáló elvek nem találnak kedvezőbb fogadtatásra, tanácsosabbnak látom, ha hallgatok róla" (ford. Fehér Márta). Newton sohasem fedte fel ezt az új érvet. A megjegyzés szövegösszefüggését tekintve lehetséges, hogy Newton saját gravitációs elmélete alapján a Naprendszer korát körülbelül százmillió évben határozta meg.

Az efféle teológiai következtetés ma is sokak számára vonzó, és legenyhébb gyanúja is fegyverbe szólítja ellenzőit, mint ahogy Newton munkájának

teológiai felhasználása is David Hume és Immanuel Kant kritikai fellépéséhez vezetett a természet tervezésén alapuló legkülönbözőbb érvek ellen, amelyeket Isten léte mellett hoztak fel. Heinz Pagels úgy véli, hogy egyes tudósok az antropikus elvet valamilyen vallás-pótléknak tekintik. Így ír:

> Természetesen egyes tudósok, azt gondolva, hogy a tudomány és a vallás kölcsönösen kizárják egymást, ... a tudomány kereteibe be nem illeszthető kérdésekkel szembekerülve ... nem szívesen folyamodnak vallásos magyarázathoz; kíváncsiságuk mégsem hagyja, hogy ne foglalkozzanak ezekkel a dolgokkal.

Lehet, hogy ez nem is olyan furcsa vád, mint amilyennek elsőre látszik. Másoknak is feltűnt már az „üdvözüléssel" kapcsolatos hagyományos vallásos eszmék érdekes hasonlósága a földön kívüli intelligens lények néhány kiemelkedő kutatójának indíttatásához, akik abban hisznek, hogy ha fejlett civilizációkkal kerülünk kapcsolatba, azok megismertetnek majd minket a világ sikeres kormányzásának titkával, és „megmentenek bennünket önmagunktól".

John Updike-ot* ezek az ellentmondások egy egész regény megírására indították, amelyben szembeállítja az angol természetteológiai hagyományt Barth-nak Isten tökéletes transzcendenciáját és világi, tudományos érvek általi elérhetetlenségét hirdető nézetével. Egy fiatal számítógépkutató nekilát, hogy a természettől a természet Istenéhez vezető számítógépes programot írjon, amelyben segítségére vannak az alapvető természeti állandók közti antropikus véletlen egybeesések, ám hatalmas lelkesedése megtörik egy liberális teológus sivár szkepticizmusán, akit meggyőztek Barth szavai: „nem vezet út tőlünk Istenhez", és akit aggaszt a diák törekvése, mert „az az isten, aki valamilyen emberi út végén áll... nem Isten lenne ". Érdekes, hogy Updike sok (bár gyakran elferdített) kozmológiai egybeesést használt regénye párbeszédeinek díszítésére, és forrásukként egy sereg tudományos népszerűsítő újságcikket jelöl meg.

Két egyszerű dolgot lehet mondani az Isten (vagy istenek) létezése iránti jó szándékú logikai és tudományos kutatásról. A logikai érvelések mind egyformák. Bizonyos feltételezésekből indulnak ki („axiómákból", ahogy a logika művelői szeretik nevezni), majd egy sor kérlelhetetlen logikai lépéssel következtetnek Isten létére. Végső elemzésben azonban nem végkövetkeztetéssel, hanem választással találjuk szembe magunkat. Csak akkor kell a következ-

*Az *Így látja Roger* c., magyarul is megjelent könyvéről van szó. – *Fehér Márta*

tetéseket elhinnünk, ha elfogadjuk a feltételezéseket. Isten létére vagy nemlétére nem lehet kétségbevonhatatlan logikai bizonyítékot találni. Mindig lesz választási lehetőség a feltételezések hitelességét illetően. Ezenfelül az is gyanítható, hogy az Isten léte mellett szóló logikai bizonyítékok híres szerzőinek – mint amilyen pl. Aquinói Tamás – személyes hitét logikai vagy tudományos bizonyításaik aláaknázása egy pillanatra sem ingatta volna meg, mert hitük nem argumentumaikban gyökerezett. Ugyanezen az alapon ők sem várhatták volna komolyan el, hogy érveik bárki mást következtetéseik elfogadására bírjanak.

Ilyen és ehhez hasonló okokból nem lehetnek az erős antropikus egybeesések Isten létét a világegyetem látszólag antropocentrikus tervezéséből levezető, meggyőző érvek, bár jól összeegyeztethetők egy efféle következtetéssel. A természeti állandók értékei közti figyelemreméltó egybeesések, amelyek a komplex élő szervezetek kifejlődését lehetővé tették, az élet létezésének csak *szükséges* feltételei, létrejöttét nem szavatolják. A mai biológusok elvetik azt az elképzelést, hogy az élet kialakulása a világegyetemben bármilyen értelemben is elkerülhetetlen. Erre a teleologikus nézetre – mely szerint a természet valamilyen jövőbeli cél felé irányul vagy vonzódik – nincs tényszerű bizonyíték, bár az ötvenes-hatvanas években ismét a figyelem középpontjába került, miután Teilhard de Chardin, a katolikus tudós és misztikus félig-meddig költői formában magáévá tette ezt az álláspontot.

Az antropikus elv pusztán azonosítja a komplex kémia kialakulásához *szükséges* egybeeséseket, amelyeket a biokémikusok alapvető fontosságúnak tartanak az élet természetes kiválasztódás általi, spontán fejlődéséhez. Az a tény, hogy számos és meglepő ilyen „egybeesés" található, nem jogosít fel arra a következtetésre, hogy ezek egyszersmind kezeskednek is a tudatos megfigyelők jelenlétéről a világegyetemben.

Életünk ideje

> Még nem jöttem rá, hogy mi, emberek miért úgy képzeljük el az időt, mint egy hátulról előrefelé tartó vonalat, amikor pedig minden irányba mehet, éppúgy, mint minden más a világ rendszerében.
>
> Ferruccio Busoni

Mindenki tudatában van az idő szubjektivitásának. Bár érzékeljük a jövő érkezését, az idő múlásáról nincs biztos érzetünk. Ennek ellenére ragaszkodunk ahhoz a meggyőződéshez (mert így olvastuk), hogy tapasztalatunk szub-

jektivitása mögött meghatározott idő áll, s hogy az idő abszolút módon megkülönbözteti a jövőt a múlttól. E gondolatok visszavezetnek a korábbi fejezetekben már felvetett kérdésekhez. A 3. fejezetben találkoztunk a termodinamika II. főtételének dilemmájával, amely az entrópia növekedési irányának segítségével választja meg az idő „nyilának" irányát. A 4. fejezetben találkoztunk a táguló világegyetem felfedezésével, amely a tágulás értelmében újabb idő-nyilat ad meg. A 3. fejezetben tárgyalt kvantumelméleti mérési paradoxon, amelyben a kvantumhullámfüggvény időben megfordítható viselkedése helyébe a mérés megfordíthatatlan hatása lép, újabb fajta megfordíthatatlansághoz vezet. Elvben a jövőt a múlttól megkülönböztető mindeme „nyilak" különbözhetnek a jövő időnek saját, tudatunkban felvett irányától. Egyesek feltételezték, hogy mindezek mély összefüggésben állhatnak egymással. Roger Penrose szerint létezik egy alapvető „entrópia", amely a világegyetem gravitációs mezejének fejlődését méri, s feltételezi, hogy e mennyiség valamiképpen szerepet játszik a termodinamika és a kvantumelméleti mérés irreverzibilis viselkedésének a világegyetem átfogó fejlődésével való egyesítésében.

Korábban is felvetették már, hogy kapcsolat van az idő lokális termodinamikai iránya és a világegyetem tágulása között. Egykor népszerű spekuláció volt a kettőt összekapcsolni azzal az eredménnyel, hogy ha a világegyetem tágulása egy napon megfordulna és összehúzódásba menne át, akkor az idő lokális irányítottsága is megfordulna, és az entrópiacsökkenést a jövőben látnánk. Íróasztalunk például magától rendezetté válna; dúskálnánk az örökmozgókban. Ám ez a következtetés nem állja ki a tüzetesebb vizsgálat próbáját. Az, hogy a világegyetem tágulásának dinamikája megfordul, globális jelenség, míg irányítottsága valamilyen mikroszkopikus folyamatban, amelyben itt és most súrlódási ellenállás lép fel, helyi, lokális jelenség. Honnan „tudhatná" a helyi folyamat, hogy a világegyetem másutt maximális mértékben kitágult? Ha a termodinamika lokális irányát a *lokális* tágulás dinamikájának tulajdonítjuk, akkor kaotikus helyzettel van dolgunk. Egy realisztikus világegyetemben egyes helyek hamarabb elérik tágulási maximumukat, mint mások. A világegyetem körzetekre tagolódik, melyek közül egyesek tágulnak, mások zsugorodnak, eltérő termodinamikai időirányokkal.

Az a gondolat, hogy az időnek több, egymástól különböző termodinamikai iránya is lehet, nem új, már előbb felmerült, mint az idő irányítottsága és a világegyetem tágulása közti kapcsolat ötlete. A 3. fejezetben megtárgyaltuk, hogyan tükrözi az entrópianövekedés termodinamikai iránya a különböző állapotok relatív valószínűségét. A rendezett állapotok valószínűsége sokkal kisebb, mint a rendezetleneké, így aztán sokkal valószínűbb, hogy egy rend-

szer a rendezettség állapotából kiindulva a káosz felé halad. Boltzmann felismerte, hogy ez a nézet a termodinamika II. főtételének és az idő ezáltal meghatározott irányának szubjektív felfogását hirdeti. Ha a világegyetem kezdeti, rendezetlen állapotában helyről helyre más és más, akkor lesznek olyan helyek, melyek valószínűtlen állapotból indulnak, entrópiájuk és rendezetlenségük emelkedő irányzatot mutat, ám lesznek más vidékek, melyek nagy valószínűségű, rendezetlen állapotban kezdődnek, s ezekből az állapotokból az evolúció az alacsonyabb entrópia és rendezetlenség felé irányulhat. Ily módon az idő lokális termodinamikai iránya a világegyetemben különböző lehet. Boltzmann így fejtegeti ezt a kérdést:

> Kétféle kép között választhatunk. Vagy azt feltételezzük, hogy jelenleg az egész világegyetem nagyon kis valószínűségű állapotban van, vagy pedig azt, hogy e valószínűtlen állapot mérhetetlen időtartama, valamint a távolság innen a Siriusig *jelentéktelenül kicsiny* az egész világegyetem korához és méreteihez képest. Egy ilyen világegyetemben, mely mint egész termikus egyensúlyban van, ezért halott, itt-ott találhatók viszonylag kicsi, a mi galaxisunkkal összemérhető nagyságú területek (ezeket „világoknak" is hívhatjuk), amelyek a termikus egyensúlytól ama mérhetetlenül hosszú időtartamok viszonylag rövid szakaszai alatt jelentősen eltérnek. E világok sokaságában állapotuk valószínűségének növekedése és csökkenése körülbelül egyforma lesz. A világegyetemben mint egészben az idő két iránya megkülönböztethetetlen, mint ahogyan az űrben sincs „fel" és „le". Ám ahogy a Föld felszínének bizonyos pontján a „le" a Föld középpontja felé mutat, hasonlóképpen az az élőlény is, amely bizonyos időszakban egy ilyen világban él, meg tudja határozni az idő „irányát" úgy, mint ami a kevésbé valószínű állapottól a valószínűbb felé halad (az előbbi a „múlt", az utóbbi a „jövő"), és...úgy találja, hogy a világegyetem többi részétől elválasztva a saját kis területe „kezdetben" mindig kis valószínűségű állapotban van. Úgy vélem, hogy csak így tekintve a dolgokat érthetjük meg a II. főtétel érvényességét és minden egyes világ hőhalálát anélkül, hogy az egész világegyetemnek egy meghatározott kezdeti állapotból a végállapotba való egyirányú változását kellene feltételeznünk.

Boltzmann világának azokban a részeiben, amelyekben az entrópia csökken, igen furcsa dolgok történnének. Poincaré szerint az olyan jól ismert fogalmak, mint az „előrejelzés", elképzelhetetlenek volnának. A súrlódás többé nem lenne lassító erő. A tárgyak maguktól felgyorsulnának. Szubjektív időnk jövőjében az óceánok hőmérséklete nem egyenlítődne ki. Az egyenlőtlenségek ingadozva fokozódnának. Nem olyan világ ez, melyben az élet akár kialakulhatna, akár fennmaradhatna. Boltzmann világa így nem áll szük-

ségképpen ellentmondásban a mi világunkkal. A gyenge antropikus elv viszont azt sugallja, hogy csak az emelkedő entrópia valamelyik szigetén létezhetünk.

A sokidejűség e birodalmáról szőtt végső okoskodásként gondoljuk végig, mi történne ama területek határfelületén, amelyekben az idő termodinamikai iránya különböző. Norbert Wiener a következő rejtvényt idézi:

> Igen érdekes gondolatkísérlet elképzelni egy intelligens lényt, akinek az ideje a miénkkel ellenkező irányban telik. Nem léphetne kapcsolatba velünk. Az általa küldött jelzés az ő szempontjából következmények, a mi szempontunkból előzmények logikai sorozataként érne el bennünket. Ezek az előzmények már tapasztalatunk részét alkotnák, és természetes magyarázatát adnák az ő jelzésének, s nem sejtenénk intelligens feladót mögötte.

Reichenbach vetett fel egy megoldást a kapcsolatteremtésre, amelyet felhasználhatunk annak megállapítására, hogy az idegen lények termodinamikai időiránya valóbam ellentétes irányú-e:

> Azt, hogy egy ilyen rendszer az ellenkező időirányban fejlődik, a rendszerből felénk haladó és érkezésekor talán színképeltolódást mutató sugárzásból lehetne megállapítani... a rendszerből felénk haladó sugárzás... nem hagyná el azt a rendszert, hanem oda érkezne. Annak a rendszernek a lakói a jelzést talán a mi rendszerünkből érkező üzenetként értelmeznék, ami azt tudatja velük, hogy a mi rendszerünk az ellenkező időirányban fejlődik. Egy összekötő fénysugárral van itt dolgunk, amelyik mindkét rendszer számára egy abszorpciós folyamatban megsemmisülő, beérkező fénysugár.

Nem nehéz ennél jobb, a rádióhullám-források és a jelátviteli zaj tulajdonságait kihasználó teszteket is elképzelni, ezen a ponton azonban elzárkózunk a további spekulációtól. A tankönyvíró halhatatlan szavaival élve, ezt az olvasóra bízzuk.

A mizantrópok

> Nem vezethetünk vissza minden törvényt egyetlen egyre..., nincs a priori eszközünk arra, hogy kirekesszük a világból a kivételest.
>
> Josiah Royce

A gyenge antropikus elvben benne rejlik az a felismerés, hogy az ősrobbanás után évmilliárdokkal a mi saját, szén alapú megfigyelői létezésünk

kiválasztási hatása megszorításokat jelent arra nézve, hogy minek a megfigyelésére számíthatunk a természetben. Ez igaz, és vitathatatlan, de vajon hasznos adalék-e eddigi tudásunkhoz? Nem mindenki véli úgy. Heinz Pagels a következőket állítja:

> Minél többet gondolkoztam azonban az antropikus elvről, annál kevésbé látszott nagy, darwini kiválasztási hatásnak, és annál inkább hasonlított azokra az elrugaszkodott magyarázatokra, amilyeneket a fizikusok adnak a világegyetem olyan tulajdonságaira, amelyeket még nem tudnak megmagyarázni. Kezdtem úgy látni, hogy az antropikus érveléshez folyamodó fizikusok és kozmológusok ok nélkül hűtlenné válnak a hagyományos fizikai tudomány sikeres programjához, ahhoz ugyanis, hogy törekedjünk világegyetemünk mennyiségi tulajdonságait általános érvényű fizikai törvények alapján megérteni... Sokáig vitatkozhatnánk a mellette és ellene szóló érvekről. Ám az efféle végtelen vita annak a tünete, ami az antropikus elvvel a baj: a fizikai elvekkel ellentétben nem ad módot annak eldöntésére, hogy helyes-e vagy helytelen, sehogyan sem lehet ellenőrizni. A hagyományos fizikai elvekkel ellentétben nem lehet kísérletileg megcáfolni... a kozmológiai elvnek a modern kozmológiai modellekre gyakorolt hatása terméketlen volt: semmit sem magyarázott meg... az antropikus érvelés elfogadásával nem tettünk szert új tudásra. Jómagam az antropikus elvet fölösleges zagyvaságnak tartom a tudomány fogalomtárában, és elvetése mellett szavaznék... Úgy vélem, hogy bár még nem ismerjük az alapvető törvényeket, de ha (és amikor) megtaláljuk őket, beléjük lesz írva az élet lehetősége egy olyan világegyetemben, melyet ezek a törvények irányítanak. Az élet létezése a világegyetemben nem a természeti törvényekre ható kiválasztási elv, hanem az idő következménye.

Ez a heves elutasítás az antropikus elv használatával szemben felhozott legtöbb szokványos ellenvetést felsorakoztatja. Lényegüket a következőképpen fogalmazhatjuk meg:

1. A tudósok évszázadokon át fáradoztak azon, hogy a tudományt elválasszák a filozófiától. Az antropikus elv mindezt hiábavalóvá teszi, mert újra összekeveri a kettőt.

2. Az antropikus elv egy teleologikus gondolkozási forma, melyet Darwin már megdöntött.

3. Az antropikus elv nem ellenőrizhető, ezért nem tudományos. Féligmeddig vallásos elv.

4. Az antropikus elv olyan, mint a „tudás hézagaiban rejtőzködő isten". Minden új felfedezéssel, melyet a világegyetem valamelyik,

eleddig érthetetlen nagy léptékű tulajdonságáról teszünk, kevesebb szükség van az antropikus elvre. Az inflációs tágulás elegánsabb magyarázatot ad a legtöbb kozmológiai tulajdonságra.

5. Az antropikus elv módszertanilag rossz. A részecskefizika azzal a reménnyel kecsegtet minket, hogy megalkotja a „minden létező elméletét", amely egyértelműen és teljesen meghatározza majd a világegyetem szerkezetét, beleértve a fizikai állandók értékét is. Az élet kifejlődésének lehetősége a világegyetemben kezdettől fogva benne rejlik ezekben a törvényekben. Az élet csupán a természeti törvények következménye.

6. Az antropikus elvben összehasonlítás rejlik más, hipotetikus világegyetemekkel. Mi csak egyetlen világegyetemről tudunk és tudhatunk.

7. Az antropikus elv a kvantummechanika „sok világ"-értelmezését hívja segítségül, ám sohasem győződhetünk meg arról, hogy a többi kvantumvilág valóban létezik.

8. Az antropikus elv életszemlélete vidékies, és azt feltételezi, hogy a világegyetemben minden élőlény mihozzánk hasonló.

Az antropikus elvre vonatkozó leggyakoribb, a fenti idézetben is szereplő félreértés az, hogy valamilyen értelemben választási lehetőségként kínálkozó, a többivel versengő kozmológiai vagy részecskefizikai elmélet. Ez meglehetősen félrevezető. Az állítás mindössze annyi, hogy az antropikus elvet a szabványos deduktív elméletek *kiegészítéseként* kell használni, különben fennáll annak a veszélye, hogy hibás következtetéseket vonunk le, vagy – ami még gyakoribb – bonyolult „magyarázatokat" szerkesztünk nemlétező problémákra. Klasszikus példa erre Dicke bizonyítása, mely szerint a Dirac-féle „nagy számok egybeesésének" magyarázata nem tesz szükségessé semmilyen szélsőséges hipotézist, mint például a newtoni gravitációs állandó időfüggésének feltételezését. A gyenge antropikus elv ezt nem magyarázza meg, de megmutatja, hogy visszatekintve nem meglepő. Annak felfedezése, hogy a gravitációs állandó a Dirac megjósolta módon csökkenő időfüggést mutat, megcáfolná eme egybeesések antropikus magyarázatát. Az antropikus magyarázat megfigyelés útján kizárható.

Az első három ellenvetés összetartozik. A tudományfilozófusok már annyira belénk nevelték paradigmáikat, párhuzamaikat és a cáfolatra meg bizonyításra helyezett hangsúlyt, hogy könnyen szem elől tévesztjük azt, hogy mindezek csak a tudomány célszerű *gyakorlatát* szolgáló módszertani elvek, amelyeknek semmi köze nincs ahhoz, hogy az egyes elméletek ténylegesen

igazak-e vagy hamisak. Ha valaki felállítja a „minden létező" helyes elméletét, az sem lesz cáfolható. Az a hit, hogy minden elméletet próbára tehetünk és cáfolhatunk, a világegyetemnek éppúgy antropocentrikus szemlélete, mint amelyet az antropikus elv ellenzői máshol oly készségesen leszólnak. Miért is épülne fel a természet az emberi intelligencia által is felfogható léptékben? Miért kellene az ember által cáfolhatónak vagy bizonyíthatónak is lennie annak, ami igaz?

A kozmológia és a részecskefizika alapvető kérdései fölöttébb sajátos típusúak. A világegyetem eredetére és szerkezetére adható bármilyen magyarázat is valószínűleg rendkívül szokatlan lesz. Bolondság volna e problémák bizonyos megközelítéseit csupáncsak azért elvetni, mert nincs megfelelőjük a hétköznapiasabb tudományos kutatásban. Helyes dolog a természetet abban a meggyőződésben tanulmányozni, hogy teljességgel megérthető, ám helytelen azért elvetni eszméket, mert nem illenek bele a Pagels által elénk tárt vallásos képbe. Szükségtelen hangsúlyozni: a gyenge antropikus elv nem állítja azt, hogy a világegyetem elsőrendűen az emberi vagy más élet kedvéért jött létre, csak annyit: lehet, hogy a világegyetem globális tulajdonságainak helyes megítélésénél az élet létezését is figyelembe kell venni.

A 4. és 5. ellenvetés a legérdekesebb. Vegyük először szemügyre a „minden létező elméletének" kérdését, amely a szuperstring-elméletek adta lendület miatt különösen időszerű. A minden létező elméletének lehetősége természetesen csak feltételezés. Bizonyíték nincs rá: a tudományba kevert filozófiai nézet (vö. az 1. ellenvetéssel). Mindazonáltal ésszerűen elfogadható feltételezés. Ésszerűtlen azonban azt elfogadni, hogy a természeti törvényeknek a maguk egységes egészében való ismerete elegendő lesz ahhoz, hogy teljes magyarázatot kapjunk a világegyetem szerkezetére és saját evolúciónkra. Még ha a természeti törvények egyértelműen meghatározottnak bizonyulnak is, e törvények megoldása nem szükségszerűen ilyen. A részecskefizikában szerzett tapasztalatból tudjuk, hogy az egyenletek megoldása nem szükségképpen rendelkezik az egyenletekével azonos szimmetriával. Még a minden létező elmélete birtokában is egészen ésszerű dolog feltételezni, hogy a világegyetem szerkezetében, sőt bizonyos mértékig törvényeiben és majdnem-szimmetriáiban is lesznek mintegy véletlenszerű elemek. Ez pedig azt jelenti, hogy még ha a látható világegyetem evolúcióját irányító egyenletek teljes készlete és alapvető állandóinak logikai úton meghatározott értéke birtokunkban lesz is, akkor sem leszünk képesek a tényleges világegyetem szerkezetét egyértelműen megjósolni, mint ahogy a Föld forgási irányát sem tudjuk megjósolni az impulzusnyomaték megmaradásának törvénye alapján.

Spekulációnak kell tekintenünk azt a feltevést is, hogy a minden létező elmélete egyértelműen megadja majd a világegyetem evolúciójának kezdeti feltételeit. Ez

még valószínűtlenebbnek látszik abban az esetben, ha a világegyetemnek nem volt kezdete (úgyhogy a kezdeti feltételek a végtelen múltba helyeződnek), vagy valamilyen korábbi kvantumállapotból szökött át, mely esetben legfeljebb a *valószínűsége* állna fenn bármilyen végállapot elérésének. Mindezekben az elképzelésekben, amelyekben a világegyetem általános szerkezetében véletlen elem is szerepel, *a priori* fölöttébb lehetséges, hogy a világegyetem olyan állapotba tágul, amely nem alkalmas szénalapú életformák kifejlesztésére és fenntartására. A világegyetem szerkezetének és evolúciójának helyes magyarázata nem hagyhatja figyelmen kívül saját evolúciónk *a posteriori* tényét.

A világegyetemet szemlélve olyan dolgokat is látunk, melyek magyarázatáért nem fordulunk alapvető természeti törvényhez: miért esik ma az eső, miért van a Földnek holdja, miért ennyi a bolygók száma a Naprendszerben és a galaxisok száma a lokális galaxishalmazban? Ezek véletlenszerű események, amennyiben a természeti törvények megsértése nélkül másképpen is lehetnének. A helyi kozmikus környezetből, ahonnan példáink származnak, viszonylag könnyű ilyen eseményeket kiemelni, ám ha a világegyetem nagy léptékű szerkezetét tekintjük, nem világos, hogy mely részeihez van szükség alapvető természeti törvény formájában kifejtett magyarázatra, és melyekhez nincs. Pagels feltételezi, hogy a világegyetem nagy léptékű szerkezetével kapcsolatban mindenre szükséges és létezik is alapvető és egyértelmű magyarázat, míg az antropikus elvből az fakad, hogy a világegyetem megfigyelt szerkezetének lehetnek olyan elemei is, melyek bizonyos szimmetriasértések véletlenszerű következményei. Csak azért tudjuk a megfigyelt következményeket megfigyelni, mert történetesen úgy esett, hogy a továbbiakban lehetővé vált a megfigyelők megjelenése. Mind a két álláspont feltételezés, mindkettő bizonyítatlan filozófiai eszméket használ fel, ám lehetséges, hogy mindkettő helytelen, vagy csak az egyik helyes; túl korai még biztosan ítélni.

A táguló világegyetem képét illetően (lásd a 4. ellenvetést) többet mondhatunk az antropikus magyarázatokkal való kapcsolatról. A kezdetben gyorsan táguló világegyetem elképzelése nemcsak hogy nem alternatívája az antropikus elvnek, hanem legtisztább formájában ténylegesen fel is kell használnia magát az antropikus elvet. A gyors tágulás a világegyetem kaotikus kezdeti állapotát feltételezi, majd minden lokális mikroszkopikus terület a benne uralkodó mikroszkopikus „simaság" meghatározta mértékben tágul. Egyes területek sokat tágulnak, mások csak keveset. Ennek eredményeképpen a világegyetem végül igen különböző feltételekkel rendelkező területekre oszlik. Mi abban a szegletében élünk, amelyiknek legalább 13 milliárd fényévnyire kellett tágulnia ahhoz, hogy létrejöhessen benne az élet. A tágulási elméletet persze meg lehetne buktatni – egyszerűen feltételeznénk, hogy egyetlen terület sem tágul

eléggé a megfigyelhető világegyetem nagy léptékű egyöntetűségének magyarázatához –, de természetesen senki sem helyeselné ezt a lépést. Az antropikus elvet *hallgatólagosan* használják annak levezetésére, hogy legalább egy területnek nagyméretűre kell tágulnia, s hogy ebben – vagy az ilyenek valamelyikében – élünk mi. Mivel nem tudjuk megmondani, hogy ténylegesen megtörtént-e a felfúvódó tágulás, és az hozta-e létre a megfigyelt világegyetem tényleges tulajdonságait, vagy pedig e tulajdonságokat ilyennek határozták meg a kezdeti feltételek vagy valamilyen, egyelőre még ismeretlen kvantumgravitációs törvény, ezért a tágulláson alapuló magyarázatot nem tudjuk minden kétséget kizáróan ellenőrizni.

A tágulláson alapuló magyarázatokban is felmerül a „más világok" kérdése. Andrei Linde, a táguló világegyetem jelenleg elfogadott modelljének egyik megalkotója szerint egy végtelen világegyetemben a miénkhez hasonlóan nagy világegyetem táguló fejlődését szükségszerűnek kell tartanunk, hiszen egy véletlenszerűen végtelen világegyetemben kezdetben a „simaság" minden lehetséges állapotában leledző mikroszkopikus területek léteznek, ami az összes lehetséges tágult állapotot eredményezni fogja.* Mi csupáncsak azért élünk az egyik nagyra tágult területen, mert az élet kialakulásához nagy világegyetemre van szükség. Jelenleg nincs okunk azt hinni, hogy egy „minden létező elmélete" ezt az érvet lényegesen meg fogja változtatni.

Ebből a gondolatból kiviláglik, hogy a végtelen világegyetem végtelen számú, okságilag elkülönült területre osztható, ahol különböző dolgok történhetnek. Ebben az esetben a „más világok" nem spekulatívak, még csak nem is titokzatosak. Jelenleg, a kezdeti feltételekre vonatkozó bárminemű határozott törvény hiányában a világegyetem lehetséges kezdeti feltételeinek megváltoztatását egyenértékűnek tekintjük a kiindulási feltételek megváltoztatásával

*A tágulás Linde-féle, „kaotikus" változatának van egy nyilvánvaló logikai hibája. A korai világegyetemet végtelennek feltételezi azért, hogy *szükségszerűen* fel tudjon mutatni egy területet, melyben a „simaság" mértéke lehetővé teszi a tágulást, mert egy kimerítően véletlenszerű végtelenben minden, ami véges valószínűséggel megtörténhet, *meg is történik* (valójában végtelenül gyakran). Majd az antropikus elvet használja annak „magyarázatára", miért elkerülhetetlen, hogy az élet e nagyméretűre tágult területek egyikében fejlődik ki. A világegyetem véletlenszerűen végtelen kiindulási állapotában azonban ugyanilyen meggondolás alapján végtelen számú olyan terület létezik, melyben a kiindulási feltételek nagy, nyugalmas, izotróp, galaxisok által benépesített világegyetem kialakulásához vezetnek *még akkor is, ha nem történik tágulás*. Ha valaki a véletlenszerű végtelen mátrixok statisztikájához akar folyamodni, minek a tágulás extra „epiciklusával" vesződni? Az antropikus elv ugyanolyan jól megindokolja a jelen állapot kialakulását a véletlenszerű végtelen kezdetből a tágulást nem alkalmazó modellben, mint a kaotikus tágulási változatban. A kaotikus tágulásban szereplő végtelen, véletlen változatok csak abban az esetben kerülik el Occam borotváját, ha a tágulást előidéző anyagtereknek a természetben léteznie kell.

Einstein egyenleteinek megoldásában. Az eredményként adódó világegyetemek mindegyikét lehetséges „más világegyetemnek" tekintjük.

A kvantummechanika „sok világ"-értelmezése a kvantumkozmológiai kutatásokkal párhuzamosan egyre népszerűbb lett. Ismét olyan típusú elmélet példája ez, amelyet ellenzői alapvetően azért utasítanak el, mert nem tetszik nekik, vagy mert nem lehet megbizonyosodni a többi világ létezéséről. Nyilvánvaló, hogy ha a világegyetem minden kvantumkölcsönhatásnál örökösen elágazik, megint csak oda jutunk, hogy a minden létező alapvető elmélete nem elegendő a világegyetem megfigyelt szerkezetének magyarázatára. A tágulás minden lehetséges foka, minden lehetséges szimmetriasértés és a természeti állandók ezekből adódó minden lehetséges értéke ténylegesen előfordul a valóságban. Az általunk lakott elágazást az a tény jelöli ki ebben az együttesben, hogy itt állnak fenn az élet kialakulásához szükséges feltételek. Míg a fent leírt szabványos elképzelésben (ahol a világegyetem fejlődésében majdnem-véletlenszerű elemek is szerepelnek) csak egyetlen lehetőség valósul meg, addig a „sok világ"-forgatókönyv szerint mind megtörténik. A „sok világ"-elképzelés védelmében azt lehet felhozni, hogy ez a rendelkezésre álló legegyszerűbb értelmezés, mert a tapasztalt dolgok magyarázatához a lehető legkisebb számú további feltételezéssel él.

A kvantummechanika értelmezési problémájára adott jellemző válasz azé a fizikusé, aki kimondja: a kvantummechanika működik, és egyedül ez számít. A kvantummechanika *értelmének* kérdése nem a fizikusokra tartozik. Más helyzetekben azonban nem értékeljük annyira az ilyen hozzáállást. Ha egy hallgató kérdezné, hogyan kell megoldani egy másodfokú egyenletet, majd azt mondaná, hogy csak a megoldáshoz vezető képletet akarja tudni, azt viszont, hogy miért működik és honnan származik, már nem, lesújtó véleményt alkotnánk róla. Az egész tudományos vállalkozás éppen annak a nézetnek az elvetésén alapul, hogy ha valami „működik", akkor az már megfelelő.

Érdekes kérdés, hogy a világegyetem minden élőlényének hozzánk hasonlóan szénalapúnak kell-e lennie. A biokémikusok véleménye szerint csak a szénalapú élet jöhet *spontán módon* létre. S bár a jövőben létrehozhatunk az „élő" jelzőre méltó mesterséges, szilícium alapú intelligenciát, ez másodlagos élet: önmagától nem fejlődhetett volna ki. Ez az állítás azonban a gyenge antropikus elv alkalmazása szempontjából valójában félrevezető. A szénnek a csillagokban való létrejöttéhez szükséges időre vonatkozó érvek a szilícium, a nitrogén, a foszfor, az oxigén és az összes nehezebb elem eredetére is érvényesek. Egészen biztosak lehetünk abban, hogy egyetlen atomi életforma sem kerülheti el a lítiumnál nehezebb elemek használatát, és e nehezebb elemek létrehozásához nagy, ősrobbanással létrejött világegyetemre van szükség.

Végezetül fontos még egyszer hangsúlyozni, hogy a mai kozmológia és részecskefizika határain jelentkező alapvető kérdések egyedülálló jellegűek. Nem hasonlítanak a laboratóriumi fizika problémáihoz. Nem tartják mindig tiszteletben a tudomány filozófiájának és gyakorlatának hagyományos dogmáit. Rendkívüli problémák ezek, rendkívüli megoldásokkal, melyeket rendkívüli módszerekkel kell a világegyetemből kicsalogatnunk. Ha módszereink végül is kudarcot vallanak, akkor az alaptudomány és a metafizikus teológia közti határt egyre nehezebb lesz megvonni. A látásnak félre kell állnia a hit előtt. Egy érzelmileg kielégítő matematikai rendszerrel szembesülve, mely elég „egyszerű" ahhoz, hogy általánosan elfogadják, de elég elvont ahhoz, hogy ne lehessen kísérletileg ellenőrizni, és elég nagystílű ahhoz, hogy ne vessen fel újabb kérdéseket, nos, akkor – a világon belüli világunkba bezárva – lehet, hogy nem marad más választásunk: el kell hinnünk. Amiről nem tudunk beszélni, arról hallgatnunk kell: ez a természeti törvények végső üzenete.

Bibliotheca Academiae Scientiarum
MAGYAR
TUDOMÁNYOS
AKADÉMIA
KÖNYVTÁRA
Hungaricae

Válogatott irodalomjegyzék

Az irodalomjegyzéket úgy állítottuk össze, hogy bevezető jellegű tájékoztatót adjon a korábbi fejezetekben megtárgyalt anyaggal kapcsolatos érdekes könyvekről és közleményekről. Az egyes címeket fejezetenként vesszük jegyzékbe, bár néhányuk egynél több fejezetre is vonatkozik. A lista nem kíván sem a téma irodalmának kimerítő áttekintése, sem a szövegben idézett művek vonatkozó hivatkozásgyűjteménye lenni. Ha azonban a téma irodalmának alapvető ismertetéseként használjuk, akkor – az idézett művek saját hivatkozási jegyzéke révén – a természetfilozófia jó áttekintését nyújtja. Az idézett munkák nem feltétlenül az első kiadások, csupán a legkönnyebben hozzáférhetőek. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy azok, amelyek a szerző (illetve magyar kiadás esetén a szerkesztő) könyvespolcán megtalálhatók voltak.

1. fejezet

Ayer, A. (ed.), *Logical Positivism* (Free Press, New York, 1959).

Language, Truth and Logic, rev. edn. (Dover, New York, 1946).

'Laws of Nature', *Revue Internationale de Philosophie* (1956).

Barbour, I. G., *Issues in Science and Religion* (Prentice-Hall, New York, 1966).

Berofsky. B. (ed.), *Free-Will and Determinism* (Harper & Row, New York, 1966).

Braithwaite, R. B., *Scientific Explanation* (CUP, Cambridge, 1956).

Bradley, F. H., *Appearance and Reality* (2nd edn., OUP, New York, 1969).

Bridgman, P., *The Logic of Modern Physics* (Macmillan, New York, 1927).

'Operational Analysis', *Philosophy of Science* 5, 114 (1938).

Butterfield, H., *The Origins of Modern Science* (Bell, London, 1957).

Campbell, N., *Physics: The Elements* (CUP, Cambridge, 1970).

What is Science? (Dover, New York, 1952).

Chalmers. A., *What is this Thing Called Science?* (Open Univ., Walton Hall, 1982).

Collingwood, R. G., *The Idea of Nature* (OUP, London, 1945).

Danto, A. – Morgenbesser, S. (eds), *Philosophy of Science* (Meridian, New York, 1960).

Dretske, F., Laws of Nature, *Philosophy of Science* 44, 248 (1977).

Ginsberg, M., 'The Concepts of Juridicial and Scientific Law', *Politica* 4, 1 (1939).

Goodman, N., *Fact, Fiction and Forecast* (Harvard UP, Cambridge, Mass., 1955).
Hacking, I., *Representing and Intervening* (CUP, Cambridge, 1983).
Harré, R., *The Philosophies of Science* (OUP, New York, 1972).
Heisenberg, W., *Válogatott tanulmányok* (Gondolat, Bp. 1967).
Körner, S., 'On Laws of Nature', *Mind* 62, 218 (1953).
Lewis, C. S., *The Abolition of Man* (Macmillan, New York, 1947).
Margenau, H., *The Nature of Physical Reality* (McGraw-Hill, New York, 1950).
MacKay, D., *The Clockwork Image* (IVP, London, 1974).
Meyerson, E., *Identity and Reality*, trans. Loewenberg, K. (Allen & Unwin, London, 1930).
Nagel, E., *The Structure of Science* (Harcourt Brace, New York, 1961).
Oldroyd, D., *The Arch of Knowledge* (Methuen, New York, 1986).
Pap, A., *An Introduction to Philosophy of Science* (Free Press, New York, 1962).
Pearson, K., *The Grammar of Science*, 3rd edn. (Macmillan, London, 1911).
Planck, M., *Válogatott tanulmányok. Az új fizika világképe* (Gondolat, Bp. 1965).
Polanyi, M., *Personal Knowledge* (Univ. Chicago, Chicago, 1960).
Popper, K., *The Logic of Scientific Discovery* (Hutchinson, London 1959).
Objective Knowledge: An Evolutionary Approach, 2nd edn. (OUP, Oxford, 1973).
Reichenbach, H., *Experience and Prediction* (Univ. Chicago, Chicago, 1938).
Rescher, N., *The Limits of Lawfulness* (Univ. Pittsburg, Pittsburg, 1983).
Ritchie, A. D., *Scientific Method: an Inquiry into the Character and Validity of Natural Laws* (Routledge, New York, 1923).
Rogers, E., *Physics For the Inquiring Mind* (Princeton UP, Princeton, 1960).
Russell, B., *Our Knowledge of the External World* (Allen & Unwin, London, 1914).
Human Knowledge: Its Scope and Limits (Allen & Unwin, London, 1948).
An Outline of Philosophy (Meridian, Ohio, 1960).
Schwartz, N., *The Concept of Physical Law* (CUP, Cambridge, 1985).
Scott, D., *Everyman Revisited: The Common Sense of Michael Polanyi* (Book Guild, Lewes, 1985).
Shapere, D., *Philosophical Problems of Natural Science* (Macmillan, New York, 1965).
Sullivan, J. W. N., *The Limitations of Science* (Penguin, London, 1938).
Toulmin, S., *Foresight and Understanding – An Enquiry into The Aims of Science* (Indiana UP, Bloomington, 1961).
Van Frassen, B. C., *The Scientific Image* (OUP, Oxford, 1980).
Wartofsky, M. W., *A tudományos gondolkodás fogalmi alapjai.* (Gondolat, Bp. 1977).
Whittaker, E., *From Euclid to Eddington: A Study of the Conceptions of the External World* (CUP, Cambridge, 1949).

2. fejezet

Barfield, O., *Saving the Appearances: A Study in Idolatry* (Harcourt Brace, New York, 1965).
Barrett, W., *The Illusion of Technique* (Doubleday, New York, 1979).
Becker, C., *The Heavenly City of the Eighteenth-Century Philosophers* (Yale UP, New Haven, 1932).
Boutroux, E., *Natural Law in Science and Philosophy*, trans. Rothwell, F. (D. Nutt, London, 1914).
Burtt, E., *The Metaphysical Foundations of Modern Science*, rev. edn. (Routledge, London, 1932).
Clagett, M., *Greek Science in Antiquity* (Abelard-Schumann, New York, 1955).

Clarke, D. M., *Descartes' Philosophy of Science* (Manchester UP, Manchester, 1982).
Clavelin, A. C., *The Natural Philosophy of Galileo* (MIT, Cambridge, Mass., 1974).
Cohen, I. B. *Isaac Newton's Papers and Letters On Natural Philosophy and Related Topics* (Harvard UP, Cambridge, Mass., 1958).
Cohen, M. R. – Drabkin, I., *Source Book in Greek Science* (McGraw-Hill, New York, 1948).
Cornforth, F. M., *The Unwritten Philosophy and Other Essays* (CUP, Cambridge, 1950).
Principium Sapientiae: The Origins of Greek Philosophic Thought (CUP, Cambridge, 1952)
Dampier-Whetham, W. C., *A History of Science and Its Relations with Philosophy and Religion* (CUP, Cambridge, 1929).
Dawkins, R., *Az önző gén* (Gondolat, Bp. 1986)
A vak órásmester (Akadémiai – Mezőgazda, Bp. 1994).
DeSantillana, G. and von Dechend, H., Hamlet's Mill: *An Essay on Myth and the Frame of Time* (Macmillan, London, 1969).
Drabkin, I. E. – Drake, S., Galileo Galilei: *On Motion and Mechanics* (Doubleday, New York, 1957).
Duhem, P., *The Aim and Structure of Physical Theory*, trans. P. Wiener (Princeton UP, Princeton, 1954).
Medieval Cosmology, trans. and ed. R. Ariew (Univ. Chicago, Chicago, 1985).
Farrington, B., *Greek Science* vols. 1 & 2 (Penguin, Baltimore, 1949).
Grant, R. M., *Miracle and Natural Law in Graeco-Roman and Early Christian Thought* (N. Holland, Amsterdam, 1952).
Frankfort, H.,–Frankfort, H. A.,–Wilson, J. A.–Jacobsen, T., *Before Philosophy*; originally entitled *The Intellectual Adventure of Ancient Man* (Penguin, Baltimore, 1949).
Frazer, J., *Az aranyág* (Századvég, Bp. 1993).
Grant, E., *Physical Science in the Middle Ages* (Wiley, New York, 1971).
Henderson, J. B., *The Development and Decline of Chinese Cosmology* (Univ. Columbia, New York, 1984).
Herschel, J., *A Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy* (London, 1830; repr. Johnson, New York, 1966).
Hertz, H., *The Principles of Mechanics* (Macmillan, New York, 1900).
Hooykaas, R., *Religion and the Rise of Modern Science* (Scottish Academic, Edinburgh, 1972).
Hume, D., *Dialogues Concerning Natural Religion.* Ed. N. Kemp-Smith (Bobbs-Merrill, Indianapolis, 1947).
Jaki, S., *Science and Creation* (Univ. Edinburgh, Edinburgh, 1974).
The Origin of Science and the Science of its Origin (Scottish Academic, Edinburgh, 1978).
Jammer, M., *Concepts of Space* (Harvard UP, Cambridge Mass., 1954).
Concepts of Force (Harvard UP, Cambridge Mass., 1957).
Jevons, W., *The Principle of Science: A Treatise on Logic and Scientific Method* (London, 1874).
Kant, I., *A tiszta ész kritikája* (Akadémiai, Bp. 1981).
Kemble, E. C., *Physical Science: Its Structure and Development* (MIT, Cambridge, Mass., 1966).
Koyre, A., *From the Closed World to The Infinite Universe* (Johns Hopkins, Baltimore, 1957).
Kuhn, T. S., *The Copernican Revolution* (Harvard UP, Cambridge, Mass., 1957).
Lewis, C. S., *The Discarded Image* (CUP, Cambridge, 1964).
Losse, J., *A Historical Introduction to the Philosophy of Science* (OUP, Oxford, 1980).
Lovejoy, A. O., *The Great Chain of Being* (Harvard UP, Cambridge, Mass., 1936).
Needham, J., *Science and Civilization in China*, vols 1–7 (CUP, Cambridge, 1954).
Human Law and the Laws of Nature in China and the West (OUP, London, 1951).

The Grand Titration: Science and Society in East and West (Allen & Unwin, London, 1969).
Newton, I., *Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World*, 2 vols., trans. and ed. F. Cajori (Univ. California, Berkeley, 1934).
Oakley, F., 'Christian Theology and the Newtonian Science: Rise of the Concept of Laws of Nature', *Church History* 30, 433 (1961).
O'Connor, D. – Oakley, F., *Creation: The Impact of an Idea* (Scribner's, New York, 1969).
Peierls, R., *The Laws of Nature* (Scribner's, New York, 1956).
Peirce, C. S., *The Laws of Nature and Hume's Argument Against Miracles.* In: Selected Writings of Charles S. Peirce. Ed. P. P. Wiener (Stanford, 1958).
Poincaré, H., *The Value of Science* (Dover, New York, 1958).
Ruby, J. E., 'The Origins of Scientific „Law"', *J. Hist. Ideas* 47, 341 (1986).
Sambursky, S., *The Physical World of the Greeks* (Routledge, London, 1956).
The Physical World of Late Antiquity (Basic Books, New York, 1962).
Sarton, G., *A History of Science*, vols. 1 & 2 (Harvard UP, Cambridge, Mass., 1952).
Schlagel, R., *From Myth to the Modern Mind* (Lang, New York, 1985).
Schrödinger, E., *Nature and the Greeks* (CUP, New York, 1954).
Simpson, G. G., *The Meaning of Evolution*, rev. edn. (Yale UP, New Haven, 1969).
Taube, M., 'Dr Zilsel on the Concept of Physical Law', *Philosophical Review* 52, 304 (1942).
Thorndike, L., *A History of Magic and Experimental Science* (Macmillan, New York, 1923).
Urmson, J. O., *Berkeley* (OUP, Oxford, 1982).
Westfall, R. S., *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton* (CUP, Cambridge, 1980).
Wallace, W. A., *From a Realist Point of View* (Univ. Press of America, Lanham, Md, 1983).
Whitehead, A. N., *Adventures of Ideas* (CUP, New York, 1933).
Science and the Modern World (CUP, London, 1953).
Zilsel, E., 'The Genesis of the Concept or Scientific Law', *Philosophical Review* 51, 245 (1942).

3. fejezet

Bohm, D., *The Special Theory of Relativity* (Benjamin, New York, 1965).
Bohr, N., *Atomic Physics and Human Knowledge* (Wiley, New York, 1958).
Atomic Theory and the Description of Nature (CUP, Cambridge, 1934).
Bergmann, P. G., *The Riddle of Gravitation* (Scribner's, New York, 1968).
Brillouin, L., *Science and Information Theory*, 2nd. edn. (Academic, New York, 1962).
Brush, S. G., *The Kind of Motion We Call Heat* (N. Holland, Amsterdam, 1976).
Campbell, L. – Garnett, W., *The Life of James Clerk Maxwell* (London, 1882).
Capek, M., *The Philosophical Impact of Contemporary Physics* (Van Nostrand, New York, 1961).
Cartwright, N., *How the Laws of Physics Lie* (OUP, Oxford, 1983).
'Do the Laws of Physics State the Facts?', *Pacific Phil. Quart.* 61, 75 (1980).
Davies, P. C. W. – Brown, J. R. (eds), *The Ghost In the Atom* (CUP, Cambridge, 1986).
D'Abro, A., *The Decline of Mechanism in Modern Physics* (Van Nostrand, New York, 1939).
D'Espagnat, B., 'The Quantum Theory and Reality' *Scientific American*, 158 (Nov. 1979).
D'Espagnat, B., *In Search of Reality* (Springer, New York, 1983).
DeWitt, B. – Graham, N., *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton UP, Princeton, 1973).

Dijksterhuis, E. J., *The Mechanization of the World Picture* (OUP, New York, 1961).
Doran, B.G., 'Origins of Field Theory', *Hist. Stud. Phys. Sci.* 6, 133 (1975).
Eddington, A. S., *The Nature of the Physical World* (CUP, London, 1932).
Einstein, A. – Infeld, L., *Hogyan lett a fizika nagyhatalom?* (Móra Könyvkiadó, Bp. 1971).
Feynman, R., *The Character of Physical Law* (MIT, Cambridge, Mass., 1965).
Folse, H., *The Philosophy of Niels Bohr* (N. Holland, Amsterdam, 1985).
Gooding, D. – James, F. A., *Faraday Rediscovered – Essays on the Life and Work of Michael Faraday, 1791–1867* (Macmillan, London, 1985).
Harman, P., *Energy, Force and Matter: the Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics* (CUP, London, 1982).
Hawkins, D., *The Language of Nature* (Freeman, San Francisco, 1964).
Heimann, P. M., 'The Unseen Universe: Physics and the Philosophy of Nature in Victorian Britain', *Brit. J. Hist. Sci.* 6, 73 (1972).
Herbert, N., *Quantum Reality* (Rider, London, 1985).
Hesse, M. B., *Forces and Fields: the Concept of Action at a Distance in the History of Physics* (Nelson, London, 1961)
Forces and Fields (Philosophical Library, New York, 1962).
Hiebert, E., 'The Uses and Abuses of Thermodynamics in Religion', *Daedalus* 95, 1046 (1966).
Holton, G., 'Mach, Einstein and the Search for Reality', *Daedalus* 97, 636 (1968).
Jammer, M., *The Philosophy of Quantum Mechanics* (Wiley, New York, 1974).
Kilmister, C., *The General Theory of Relativity* (Pergamon, Oxford, 1973).
Maxwell, J. C., *Atom*, In: *Encyclopedia Brittanica*, 1875.
McCormmach, R., *Night Thoughts of a Classical Physicist* (Harvard UP, Cambridge, Mass., 1982).
Mermin, D. N., 'Is the Moon There When Nobody Looks? Reality and the Quantum Theory', *Physics Today*, 38 (Apr. 1985).
Merz, J. T., *A History of European Thought in the Nineteenth Century* (London, 1907).
Niven, W. D. (ed.), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, 2 vols. (Dover, New York, 1966).
Pais, A., *Subtle is the Lord: The Science and Life of Albert Einstein* (OUP, Oxford, 1982).
Peynson, L., 'Relativity in Late Wilhelmian Germany: The Appeal to a Pre-established Harmony between Mathematics and Physics', *Archive for History of Exact Sciences* 27, 137 (1982).
Rae, A., *Quantum Physics – Illusion or Reality?* (CUP Cambridge, 1986).
Raine, D. – Heller, M., *The Science of Space-Time* (Pachart, Tucson, 1982).
Rosenthal-Schneider, I., *Reality and Scientific Truth: Discussions with Einstein* (Von Laue and Planck, Wayne State, Penn., 1980).
Russell, B., *The ABC of Relativity* (Allen & Unwin: London, 1926).
Sciama, D. W., *The Physical Foundations of General Relativity* (Heinemann, London, 1972).
Szilárd, L., 'On the Reduction of Entropy of a Thermodynamic System Caused by Intelligent Beings'. *Zeitschrift für Physik* 53, 840 (1929).
Taylor, E. F. – Wheeler, J. A., *Spacetime Physics* (Freeman, San Francisco, 1966).
Turner, J., 'Maxwell on the Method of Physical Analogy', *Brit. J. Phil. Sci.* 6, 226 (1955).
Wheeler, J. A., 'Niels Bohr, the Man', *Physics Today* 66 (Oct. 1985).
Wheeler, J. A. – Zurek, W. H., *Quantum Theory and Measurement* (Princeton UP, Princeton, 1983).
Wigner, Jenő, *Szimmetriák és reflexiók* (Gondolat, Bp. 1972).
Williams, L. P., *The Origins of Field Theory* (Univ. Press of America, New York, 1980).

4. fejezet

Aitchison, I. – Hey, A., *Gauge Theories in Particle Physics* (Hilger, Bristol, 1982).

Barrow, J. D., 'Cosmology and Elementary Particles', *Fundamentals of Cosmic Physics* **8**, 83 (1983).

Barrow, J. D. – Silk, J., *The Left Hand of Creation: The Origin and Evolution of the Expanding Universe* (Basic Books, New York, 1983).

Barrow, J. D. – Tipler, F. J., 'Eternity is Unstable', *Nature* **276**, 453 (1978).

Barrow, J. D. – Turner, M. S., 'The Inflationary Universe: Birth, Death and Transfiguration', *Nature* **298**, 801 (1982).

Bondi, H., *Cosmology*, 2nd edn. (CUP, Cambridge, 1961).

Burrill, D. R., *The Cosmological Arguments: a Spectrum of Opinion* (Doubleday, New York, 1967).

Capra, F., *The Tao of Physics* (Wildwood House, Bungay, 1975).

Davidson, H. A., *Proofs for Eternity, Creation and the Existence of God in Medieval Islamic and Jewish Philosophy* (OUP, New York, 1987).

Davies, P. C. W., *Other Worlds: Space, Superspace and the Quantum Universe* (Dent, London, 1980).

God and the New Physics (Dent, London, 1983).

Superforce (Heinemann, London, 1984).

Dyson, F., 'Time Without End: Physics and Biology in an Open Universe', *Reviews of Modern Physics* **51**, 447 (1979).

Feynman, R., *QED: The Strange Story of Light and Matter* (Princeton UP, Princeton, 1985).

Frank, P., 'The Place of Logic and Metaphysics in the Advancement of Modern Science', *Philosophy of Science* **5**, 275 (1948).

Fritzsch, H., *Quarks* (Simon & Schuster, New York, 1983).

Green, M., Schwartz, J. and Witten, E. *Superstring Theory*, 2 vols. (CUP, Cambridge, 1987).

Gribbin, J., *In Search of the Big Bang* (Heinemann, London, 1986).

Grünbaum, A., *Philosophical Problems of Space and Time* (Knopf, New York, 1963).

Guth, A., 'The Inflationary Universe', *Physical Review D* **23**, 347 (1981).

Hawking, S. W. – Hartle, J., 'The Wave Function of the Universe', *Physical Review* **28**, 960 (1983).

Hawking, S. W. – Israel, W. (eds.), *300 Years of Gravity* (CUP, Cambridge, 1987).

Heisenberg, W., *The Representation of Nature in Contemporary Physics*. In: Rollo May (ed.), Symbolism in Religion and Literature (Braziller, New York, 1960).

Isham, C. – Penrose, R. – Sciama, D. W. S., *Quantum Gravity II* (OUP, Oxford, 1981).

Jaki, S., *Cosmos and Creator* (Scottish Academic, Edinburgh, 1980).

Mach, E., *Popular Scientific Lectures* (Open Court, New York, 1943).

The Science of Mechanics, a Critical and Historical Account of Its Development (Open Court, New York, 1960).

The Analysis of Sensation and the Relation of the Physical to the Psychical (Dover, New York, 1959).

MacKay, D., *Brains, Machines and Persons* (Collins, London, 1980).

Human Science and Human Destiny (IVP, New York, 1979).

McCrea, W. H., 'A Philosophy for Big-Bang Cosmology', *Nature* **228**, 21 (1970).

Milne, E., *Modern Cosmology and the Christian Idea of God* (OUP, Oxford, 1952).

Montagu, A. (ed.), *Science and Creationism* (OUP, New York, 1984).

Munitz, M. (ed.), *Theories of the Universe – From Babylonian Myth to Modern Science* (Free Press, New York, 1957).

North, J. D., *The Measure of the Universe: A History of Modern Cosmology* (OUP, Oxford, 1965).

Pagels, H., *The Cosmic Code: Quantum Physics as the Language of Nature* (Simon & Schuster, New York, 1982).
Pais, A., *Inward Bound* (OUP, Oxford, 1986).
Redfield, R., *The Primitive World and its Transformations* (Cornell UP, Ithaca, 1953).
Rowe, W., *The Cosmological Argument* (Princeton UP, Princeton, 1975).
Sorabji, R., *Time, Creation, and the Continuum* (Duckworth, London, 1983).
Stebbing, S., *Philosophy and the Physicists* (Methuen, London, 1937).
Tipler, F. J., 'Interpreting the Wave Function of the Universe', *Physics Reports* **137**, 231 (1986).
Toulmin, S., *The Return to Cosmology* (Univ. California, Berkeley, 1982).
Trefil, J., *The Moment of Creation: Big Bang Physics from Before the First Millisecond to the Present Universe* (Scribner's, New York, 1983).
Tryon, E., 'Is the Universe a Vacuum Fluctuation?', *Nature* **246**, 396 (1973).
Vilenkin, A., 'Creation of the Universe from Nothing', *Physics Letters B* **117**, 25 (1983).
Von Melsen, A. G., *From Atomos to Atom* (Harper, New York, 1960).
Weinberg, S. W., *Az első három perc.* (Gondolat, Bp. 1982).
The Discovery of Subatomic Particles (*Sci. American Library*, New York, 1983).
Zukav, G., *The Dancing Wu Li Masters* (Morrow, New York, 1979).

5. fejezet

Andreski, S., *Social Sciences as Sorcery* (A. Deutsch, London, 1972).
Arnold, V. I., *Catastrophe Theory*, 2nd edn. (Springer, New York, 1986).
Aubert, K. E., 'Spurious Mathematical Modelling', *Math. Intelligencer* **6**, 54 (1984).
Bennett, C. H., 'The Thermodynamics of Computation – A Review', *International Journal of Theoretical Physics* **21**, 905 (1982).
Bennett, C. H. – Landauer, R., 'The Fundamental Physical Limits of Computation, *Scientific American* **253**, (No. 1) 48 és (No. 4) 6 (1985).
Bernardete, J. A., *Infinity: An Essay in Metaphysics* (OUP, Oxford, 1964).
Birkhoff, G., 'A Mathematical Approach to Aesthetics', *Scientia* (Sept. 1931), 133.
'The Mathematical Nature of Physical Theories', *American Scientist* **31**, 281 (1943).
Bishop, E., *The Foundations of Constructive Mathematics* (McGraw-Hill, New York, 1967).
'The Crises in Contemporary Mathematics, *Historia Mathematica* **2**, 507, (1975).
Black, M., *The Nature of Mathematics* (Paterson, Littlefield, Adams & Co., New York, 1959).
Bochner, S., *The Role of Mathematics in the Rise of Science* (Princeton UP, Princeton, 1966).
Brillouin, L., *Scientific Uncertainty and Information* (Academic, New York, 1964).
Carnap, R., *Foundations of Logic and Mathematics*, vol. I, no. 3 (*International Encyclopedia of Unified Science*, Univ. Chicago, Chicago, 1939).
Cassirer, E., *Determinism and Indeterminism in Modern Physics* (Yale UP, New Haven, 1956).
Chaitin, G., 'Information-Theoretic Limitations of Formal Systems', *J. of Assoc. for Computing Machinery* **21**, 403 (1974).
Algorithmic Information Theory (*Encyclopedia of Statistical Sciences* vol. 1, 38; 1982).
Davis, M., *The Undecidable* (Raven, New York, 1965).
Davis, M. – Hersh, R., *The Mathematical Experience* (Harvester, Brighton, 1981).

Deutsch, D., 'Quantum Theory, the Church-Turing Principle, and the Universal Quantum Computer', *Proceedings of the Royal Society London A* 400, 97 (1985).
Dummett, M., *Elements of Intuitionism* (OUP, Oxford, 1977).
Dyson, F., 'Mathematics in the Physical Sciences', *Scientific American*, 129 (Sept.1964).
Escher, M., *The Graphic Work of M. C. Escher* (Pan, London, 1961).
Feynman, R., 'Simulating Physics with Computers', *International Journal of Theoretical Physics* 21, 467 (1982).
Fredkin, E. – Tolloli, T., 'Conservative Logic', *International Journal of Theoretical Physics* 21, 219 (1982).
Geroch, R. – Hartle, J., *Computability and Physical Theories.* In: Between Quantum and Cosmos. Eds Zurek, W. – Merwe, A. van der – Miller, W. A. (Princeton UP, Princeton, 1988) 549–567.
Hadamard, J., *The Psychology of Invention in the Mathematical Field* (Princeton UP, Princeton, 1945).
Hardy, G. H., 'Mathematical Proof', *Mind* 38, 1 (1928).
Hempel, C. G., 'On the Nature of Mathematical Truth', *Amer. Math. Monthly* 52, 543 (1945).
Hofstädter, D., *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (Basic Books, New York, 1979).
Kitcher, P., *The Nature of Mathematical Knowledge* (OUP, Oxford, 1983).
Kline, M. *Mathematics in Western Culture* (OUP, New York, 1953).
Mathematics and the Physical World (Dover, New York, 1981).
Landauer, R., *Reversible Computation.* In: *Der Informationsbegriff in Technik und Wissenschaft.* Eds Folberth, O. G. – Hackl, C., (Oldenbourg, München,1986).
Le Lionnais, F., *Great Currents of Mathematical Thought*, vols 1 & 2 (Dover, New York, 1971).
Mandelbrot, B., *The Fractal Geometry of Nature* (Freeman, San Francisco, 1982).
Merlan, P., *From Platonism to Neoplatonism* (Martinus Nijhoff, The Hague, 1960).
Myhill, J., 'What is a Real Number?', *Amer. Math. Monthly* 79, 748 (1972).
Rucker, R., *Infinity and the Mind* (Harvester, Brighton, 1982).
Tarski, A., *A deduktív tudományok metodológiájának alapvető fogalmai.* In: Bizonyítás és igazság. Vál. Ruzsa Imre (Gondolat, Bp. 1990).
Thom, R., *Structural Stability and Morphogenesis* (Benjamin, New York, 1975).
Traub, J. F. (ed.), *Algorithms and Complexity: New Directions and Recent Results* (Academic, New York, 1976).
Turing, A., 'On Computable Numbers, with an application to the Entscheidungproblem', *Proc. London Math. Soc (Ser. 2)* 42, 230 (1936); erratum 43, 546 (1936).
Wedberg, A., *Plato's Philosophy of Mathematics* (Greenwood, Westport Conn. 1977).
Weyl, H., *Philosophy of Mathematics and Natural Science* (Princeton UP, Princeton, 1949).
Whitney, H., 'The Mathematics of Physical Quantities', *Amer. Math. Monthly* 75, 115 & 227 (1968).
Wigner, J., *Szimmetriák és reflexiók* (Gondolat, Bp. 1972).
Wolfram, S., 'Statistical Mechanics of Cellular Automata', *Rev. Mod. Phys.* 55, 601 (1983).
'Undecidability and Intractability in Theoretical Physics', *Phys. Rev. Letts.* 54, 735 (1985).
Yanin, Y., *Mathematics and Physics* (Birkhauser, Boston, 1983).

6. fejezet

Barrow, J. D., 'The Lore of Large Numbers', *Quarterly Journal Royal Astron. Soc.* **22**, 388 (1981).
'Natural Units Before Planck', *Quarterly Journal Royal Astron. Soc.* **24**, 24 (1983).
Bohm, D., *Causality and Chance in Modern Physics* (Routledge, London, 1957).
Born, M., *The Natural Philosophy of Cause and Chance* (OUP, London, 1949).
Bridgman, P., *Dimensional Analysis*, rev. edn. (Yale UP, New Haven, 1931).
Carnap, R., 'What is Probability?', *Scientific American* **189**, 128 (1953).
Davies, P. C. W., *The Edge of Infinity* (Dent, London, 1981).
Eigen, M. – Schuster, P., 'The Hypercycle, A Principle of Natural Self-Organization', *Naturwissenschaften* **64**, 541 (1977).
Eigen, M. – Winkler, R., *The Laws of the Game* (Penguin, London, 1981).
Froggatt, C. D. – Nielsen, H. B., *Origin of Symmetries* (World, Singapore, 1990).
Hawking, S. W. – Ellis, G. F. R., *The Large-scale Structure of Space-time* (CUP, Cambridge, 1973).
Hawking, S. W. – Israel, W. (eds), *General Relativity: An Einstein Centenary Volume* (CUP, Cambridge, 1979).
Kaufmann, W., *The Cosmic Frontiers of General Relativity* (Little, Brown & Co., Boston, 1977).
Kippenhahn, R., *100 Billion Suns* (Basic Books, New York, 1983).
Iliopoulos, J., Nanopoulos, D. V. – Tamaros, T. N., 'Infrared Stability or Anti-Grand Unification'. *Physics Letters B* **94**, 141 (1983).
Levy-Leblond, J. M., 'Constants of Physics', *Rivista Nuovo Cimento* **7**, 187 (1977).
McCrea, W. H. – Rees, M. J. (eds), *The Constants of Physics* (The Royal Society, London, 1983).
Nicolis, G. and Prigogine, I., *Self-organization in Non-equilibrium Systems* (Wiley, New York, 1977).
Prigogine, I. – Stengers, I., *Order Out of Chaos* (Heinemann, London, 1984).
Schrödinger, E., *Science and the Human Temperament* (Norton, New York, 1935).
Tipler, F. J., – Clarke, C. – Ellis, G. F. R., *Singularities and Horizons – A Review Article.* In: General Relativity and Gravitation: An Einstein Centenary Volume. Ed. A. Held. (Plenum, New York, 1970).

7. fejezet

Bacon, F., Novum Organum (Művelt Nép, Bp. 1954).
Barrow, J. D., 'Life, the Universe and the Anthropic Principle', *The World and I* **2**, 179 (Aug. 1987).
Barrow, J. D. – Bhavsar, S. P., 'What the Astronomers' Eye Tells the Astronomers' Brain', *Quarterly Journal Royal Astron. Soc.* **28**, 109 (1987).
'Anthropic Definitions', *Quarterly Journal Royal Astron. Soc.* **23**, 146 (1983).
Barrow, J. D. – Tipler, F. J., *The Anthropic Cosmological Principle* (OUP, Oxford, 1986).
Barrow, J. D. – Tipler, F. J., *L'Homme et le Cosmos* (Imago, Paris. 1984).
Bridgman, P., *Reflections of a Physicist* (Philosophical Library Inc., New York, 1950).
Bronowski, J., *The Identity of Man*, rev. edn. (Natural History Press, New York, 1971).
Bunge, M., *The Myth of Simplicity* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1963).
Carr, B. J. – Rees, M. J., 'The Anthropic Principle and the Structure of the Physical World', *Nature* **278**, 605 (1978).

Carter, B., *Large Number Coincidences and the Anthropic Principle in Cosmology.* In: Confrontation of Cosmological Theories with Observation. Ed. M. Longair (Reidel, Dordrecht, 1974).
Dyson, F., 'Energy in the Universe', *Scientific American* 224, 50 (Sept. 1971).
Eccles, J., *The Human Mystery* (Springer, New York, 1979).
Gombrich, E. H., *Művészet és illúzió* (Gondolat, Bp. 1972).
Gregory, R. L., *Az értelmes szem* (Gondolat, Bp. 1973).
Mind in Science (Weidenfeld & Nicolson, London, 1981).
Heisenberg, W., *Physics and Beyond* (Harper & Row, New York, 1962).
Henderson, L. J., *The Fitness of the Environment* (Macmillan, New York, 1913. repr. with introduction by G. Wald, Harvard UP, Cambridge, Mass., 1970).
Howson, C. (ed.), *Method and Appraisal in the Physical Sciences* (Cambridge UP, Cambridge, 1976).
Kuhn, T. S., *A tudományos forradalmak szerkezete* (Gondolat, Bp. 1984).
Leslie, J., 'Observership in Cosmology: the Anthropic Principle', *Mind* 92, 573 (1983).
Lovell, B., *In the Centre of Immensities* (Harper and Row, New York, 1983).
Luckiesh, M., *Visual Illusions* (Dover, New York, 1965).
Marr, D., *Visions* (W. H. Freeman, San Francisco, 1982).
Maurois, A., *Illusions* (Columbia UP, New York, 1968).
Mehra, J. (ed.), *The Physicist's Conception of Nature* (Reidel, Dordrecht, 1973).
Page, D., 'The Importance of the Anthropic Principle', *The World and I* 2, 392 (Aug. 1987).
Pagels, H., 'A Cozy Cosmology', *The Sciences* 34 (Mar./Apr. 1985).
Pagels, H., *Perfect Symmetry: The Search For the Beginning of Time* (Joseph, London, 1985).
Reichenbach, H., *The Direction of Time* (Univ. California, Berkeley, 1956).
Santayana, G., *The Sense of Beauty* (Dover, New York, 1955).
Shklovskii, I. S. – Sagan, C., *Intelligent Life in the Universe* (Dell, New York, 1966).
Thorpe, W., *Purpose in a World of Chance: A Biologist's View* (OUP, Oxford, 1978).
Wallace, A. R., *Man's Place in the Universe* (Chapman and Hall, London, 1912).
Weyl, H., *God and The Universe: The Open World* (Yale UP, New Haven, 1932).
Wheeler, J. A., *From Relativity to Mutability.* In: The Physicist's Conception of Nature. Ed. J. Mehra. (Reidel, Dordrecht, 1973).

Az ábrák forrásai

A 162. oldalon látható 3.12 ábrát A. Beiser (1967): *Concepts of Modern Physics* (átdolgozott kiadás) című könyvéből, a 247. oldalon bemutatott diagram alapján vettük át, a McGraw-Hill kiadó engedélyével.

A 281. oldalon szereplő 4.10 ábra Benoit B. Mandelbrot *The Fractal Geometry of Nature* című könyve 189. táblájának reprodukciója (Copyright 1977, 1982, 1983), W. H. Freeman and Company engedélyével.

A 362. oldalon az 5.8 (a)–(c) ábrát M. Henon engedélyével *„A Two-dimensional Mapping with a Strange Attractor"* című cikke 2–5. ábráiról másoltuk: *Communications in Mathematical Physics* 50, 69–77 (1976).

A 415. oldalon közölt 7.2 ábra J. L. Marroquin (1976) *„Human Visual Perception of Structure"* című disszertációjából (MIT) származik, a Massachusetts Institute of Technology engedélyével.

A 419. oldalon látható 7.3 ábrát Richard L. Gregory (1970): *The Intelligent Eye* című könyvéből vettük át, Weidenfeld és Nicolson, London engedélyével.

*

A 39. és a 40. oldalon szereplő kivonatot Eric M. Rogers: *Physics for the Inquiring Mind: the Methods, Nature, and Philosophy of Physical Science* című művéből (Copyright 1960, Princeton University Press és Oxford University Press; szemelvény, 344.) a Princeton University Press engedélyével közöljük.

7907/94

A kiadásért felelős az Akadémiai Kiadó és Nyomda igazgatója
A szedés és tördelés a TINTA Bt. (1116 Bp. Szatmárhegy u. 13.) munkája
A nyomást és a kötést az Akadémiai Kiadó és Nyomda végezte
Felelős vezető: Zöld Ferenc
Budapest, 1994
Nyomdai táskaszám: 23.349
Felelős szerkesztő: Bártfai László
Műszaki szerkesztő: Nyárádi Tamásné
A fedéltervet készítette: Gerhes Gábor
Kiadványszám: II/2979
Megjelent 42,54 (A/5) ív terjedelemben

MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA KÖNYVTÁRA
Bibliotheca Academiae Scientiarum Hungaricae

Az utóbbi években jelentősen megemelkedett az úgynevezett „népszerű tudományos" kiadványok száma, e művek közös célja az volt, hogy az elmúlt évtizedben az alaptudományokból kiáramló új eszméket és felfedezéseket egyszerű nyelven magyarázzák meg. Jelen könyv szerzője nyomozásra invitálja az Olvasót, amely a történelem előtti kortól kezdve végigvezet az alapvető fizikai tudományok és az azokat kísérő, segítségükkel életre hívott filozófia kulcsfogalmainak fejlődésén. Újra és újra visszatér a régi kérdésekhez melyek új köntösben jelentkeznek: a természet logikáját leleplező azon egyszerűségnek álcázott bonyolultságra, amelyet minden természeti jelenség fémjeleként ismertünk fel, a belső és külső tér láthatóvá nem is tehető világára kiterjesztve, elmélyítve és középpontba helyezve. Valóban léteznek természeti törvények, gondolkozásunktól függetlenül, csak arra várva, hogy felfedezzük őket, vagy pusztán a már leírható dolgok leírásának legkényelmesebb módjai? A természeti törvények mindenütt ugyanazok-e? Vannak-e olyan helyek, ahol már nem érvényesek? Időben változhatnak-e? Sőt mi több, lehetséges-e, hogy természeti törvények egyáltalán nem is léteznek? A matematika nyelve miért képes olyan jól kifejezni a világegyetem működését? Mi a jelentősége saját létezésünknek abból a szempontból, hogy miképpen értelmezzük a világegyetem szerkezetét? Elegendő-e intellektuális képességünk arra, hogy megértsük a természet összhangja és bonyolultsága mögött rejlő legmélyebb elveket?

A könyv lapjain személyes és csak egyes részletekre kiterjedő kép rajzolódik ki. A mű félig ismeretterjesztő jellegű, részrehajló a matematikai és fizikai tudományok irányában. Nem állítja, hogy teljes. Nem hirdet evangéliumot, nem ígér új beállítást, csak egy hézagos történetet akar elmondani. A kortárs problémákat előmeneteli jelentés formájában vitatja meg, a pillanatnyi eszmékből elvi pontokat próbál kiemelni, és ezért mérni is e szerény mércével kell.

A szerző előszavából

Ára: 1655,– Ft áfával

J. D. Barrow • A FIZIKA VILÁGKÉPE

699219