

John Gribbin

Schrödinger kiscicái és a valóság keresése

Az eredeti mű címe: John Gribbin Schrödinger's Kittens and the Search for Reality

Fordította: Dr. Both Előd Lektor: Abonyi Iván Szerkesztette: Oláh Judit

Fedélterv: Kállai Nagy Krisztina

Copyright © 1995 John and Mary Gribbin Hungarian translation © Dr. Both Előd, 2004 Hungarian edition © Akkord Kiadó, 2004

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

John Gribbin asztrofizikából doktorált a Cambridge-i Egyetemen, jelenleg a Sussexi Egyetem csillagászati tanszékének külső munkatársa. Számos nagy sikerű ismeretterjesztő könyve közül néhány: In Search of Schrödinger's Cat (Schrödinger macskája - Akkord Kiadó, 2003), The Birth of Time (Az idő születése - Akkord Kiadó, 2003), In search of the BigBang, In the Beginning, Companion to the Cosmos, Q is for Quantum és Almost Everyone's Guide to Science (A természettudományokról mindenkinek - Akkord Kiadó, 2002). Legújabb könyve a Science: A History (A tudomány története - Akkord Kiadó, 2004). Könyveit számos nyelvre lefordították, azokkal Nagy-Britanniában és az Egyesült Államokban több díjat nyert. A Royal Society of Literature tagja. Tudományos-fantasztikus műveket is ír. John Gribbin Sussexben él, feleségével, Maryvel, aki ugyancsak ismeretterjesztő író.

ISBN 963 9429 57 0 ISSN 1586-8419

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

Tartalom

Köszönetnyilvánítás
Előszó

Bevezetés: A probléma
A fantasztikus fény; Az elektronok interferenciája;
A hagyományos kép; Mély víz; Macska a dobozban;

A valóság másik arca; Schrödinger macskájának kölykei

1. A fény - az ősidőkben

Az első modern természettudós; Woolsthorpe-tól Cambridge-ig - és vissza; Newton árnyékában; Newton világképe; Young elképzelései; Fresnel, Poisson és a fényes pont; A könyvkötőinas; Faraday erőterei; A varázslat színei; Maxwell bámulatos egyenletei

2. Modern idők

Az éter halála; Irány a speciális relativitáselmélet; Einstein ösztönös megérzése; Gyorsabban a félynél - vissza az időben; Színre lép a foton; Aki megtanította Einsteint megszámolni a fotonokat; A fény és az anyag különös elmélete; A kvantumelektrodinamika diadala;

Fény a jövőből

3. Különös, de igaz

A lehetetlen fény; Fény derül a fényre; Kettős látás; Valamit a semmiért; „Küldj fel a fedélzetre, Scotty”; Kvantumkriptográfia; A foton belsejében; Megfigyeljük a kvantumfazekat; Körülkerítjük az elektront; Mikor a foton?

4. Kétségbeesett próbálkozások

Koppenhága összeomlása; Azt hiszem, ezért; Neumann János hibája; Az osztatlan egész; A világegyetem sokasodása; Variációk egy kvantumtémára; Kétségbeesett helyzetben; Relativisztikus részletkérdés; Kísérlet az idővel

5. Elmélkedés a dolgokról való elmélkedésről

Megalkotjuk a kvarkokat; Einstein megítélése; A leírhatatlan leírása; Megragadjuk a valóságot; A kvantumvalóság nagy tételben

Epilógus

A megoldás - korunk mítosza; Létrehozzuk a tömeg legnagyobb részét; A gravitáció összehúrozása; A bonyolultság egyszerű arca; Kezet rázunk a Világegyetemmel; Megragadjuk az időt az idő létrehozására

Irodalomjegyzék

Mutató

Köszönetnyilvánítás

Egy ehhez hasonló könyv megírása mindig számos tudós segítőkészségén múlik, akik rendelkezésemre bocsátották tudományos dolgozataik egy-egy példányát, gyakran még a cikk megjelenése előtt. Mindezen információforrásokat a szöveg közben is megemlítem, néhányuknak azonban külön is ki szeretném emelni a nevét, mert a velük folytatott konzultációk és levelezés alapvetően befolyásolta a kvantummechanikai valóságról alkotott felfogásomat. A következőknek szeretnék - névsorban-mindenekelőtt köszönetet mondani: Bruno Augenstein (RAND, Santa Monica), Shu-Yuan Chu (University of California, Riverside), John Cramer (University of Washington, Seattle), Paul Davies (University of Adelaide), Dipankar Home (Bose Institute, Calcutta), Geoff Jones (University of Sussex), Martin Krieger (University of Southern California) és Thanu Padmanabhan (Tata Institute, Bombay).

A Sussexi Egyetem ezúttal még több segítséget nyújtott, mint korábbi könyveim esetén, mert a csillagászat vendégkutatójává neveztek ki, így hozzáférhettem az egyetem igen kiváló tudományos könyvtárához és az internethez, ráadásul a sussexi csillagász kollégák kísérleti nyúlként szolgáltak, akiken kipróbálhattam kevésbé konvencionális elképzeléseim fogadtatását. Az ő segítségük nélkül nem jöhetett volna létre ez a könyv.

Előszó

Amikor megírtam az éppen tíz évvel ezelőtt megjelent történeti összefoglalómat a kvantummechanikáról, egy pillanatig sem gondoltam volna, hogy egy újabb könyvben vissza fogok térni a kvantumvilág rejtelseihez. Amikor a Schrödinger macskáját írtam, csupán azt akartam megmutatni, milyen különös és titokzatos a kvantumfizika birodalma. Az olvasó elé szerettem volna tárni azt a kérlelhetetlenül precíz logikát, amellyel a meghökkentő kísérleti eredményektől eljutunk az ép ésszel szinte felfoghatatlan elméletekig, amelyek igazságát viszont további kísérletek bizonyítják, arra késztetve a fizikusokat, hogy a mégoly bizarr állításokat is komolyan vegyék. Az 1980-as évek közepén gondolatmenetem azon alapult, hogy bármily szokatlanok is az előforduló fogalmak, a kvantummechanika mégiscsak működik - éppen ennek az elméletnek köszönhetően értjük a lézert, a számítógépek elektronikus áramkörei, a DNS-molekula és sok egyéb dolog működését. A régi elképzelések, vagyis az úgynevezett „klasszikus” fizika tételei, egyszerűen képtelenek magyarázatot adni ezekre a jelenségekre. Szó, ami szó, a Schrödinger macskájában nem arra fektettem a hangsúlyt, milyen nehéz megérteni a kvantummechanikát, sokkal inkább arra, hogy az elmélet valóban működik. Richard Feynman megállapítása szerint „senki sem érti a kvantummechanikát”, így azután nyugodt lélekkel zárhattam előző könyvemet a következő kijelentéssel: „örömmel adom át Önöknek az elvarratlan szálakat és a távolban lebegő célok felé vezető nyomokat, amelyek számos, éppoly izgalmas történet forrásául szolgálhatnak, mint amilyen érkézfeszítő Schrödinger macskájának a története volt”.

Miközben én az elvarratlan szálaknak örültem, a fizikusok nem nyugodtak bele, hogy csak üljenek a babérjaikon. Nem volt ínyükre, hogy nem értik az elméletet, még ha az működik is, ezért fáradhatatlanul dolgoztak a kvantummechanika rejtelseinek megoldásán azóta is, hogy 1984-ben áttekintettem a tudományterület helyzetét. Jóllehet, fáradozásuk eredményeképpen sok rejtelen még rejtélyesebbé vált, ám a kvantumok világa különlegességének számos újabb vonására derítettek fényt. Kidolgozták a kvantummechanika külső szemlélő számára kétségbetűzően bizarr rejtélyeinek magyarázatát. Az elmúlt néhány év leforgása alatt kidolgozott magyarázat több mint hatvanévi sikertelen próbálkozás után talán hiteles bepillantást engedhet a történésekbe - és ez a magyarázat nemcsak a szakemberek számára érthető, hanem mindazok számára, akik érdeklődnek a valóság természete iránt.

Ez az új felfogás nem egyszerűen a kvantumelmélet megfelelő értelmezésén nyugszik, hanem a fény viselkedésének Albert Einstein relativitáselmélete keretében történő magyarázatán is. Ebben a könyvemben mindkét történet legújabb fejleményeit el szeretném mondani. Meg fogom mutatni, hogy a Világegyetem működésének legjobb magyarázatához és a kvantummechanika rejtélyeinek megoldásához egyaránt arra van szükség, hogy összeházasítsuk a kvantummechanika és a relativitáselmélet fogalmait.

Könyvemben az olvasó nem nagyon fog a kvantummechanika történeti áttekintésével találkozni, ezt a témát ugyanis korábban már kimerítettem. Éppen ezért a kvantummechanikát az első pillanattól kezdve jól megalapozott sikertörténetként kezelem, és inkább az új talányokról vagy a régi rejtélyek újszerű megközelítéséről szeretnék beszélni, mielőtt rátérnék mindezen talányok megoldására. Meg fognak viszont találni a könyvben minden információt, amire a kvantummechanikában folyó vita megértéséhez szükségük lehet, függetlenül attól, hogy olvastak-e már valamit erről a témáról (például az én könyveimet).

Olyan paradox jelenségekről fognak olvasni, mint az egyszerre két helyen lévő fotonokról (a fény részecskéiről), az egyszerre két különböző úton mozgó atomokról, a fénysebességgel mozgó részecskékben megálló időről, végül arról a komoly elgondolásról, mely szerint a kvantumelmélet segítségével talán megvalósítható lehet a Star Trek típusú teleportáció.

Mindamellett, hogy helyben legyünk, nagyjából ott folytatom, ahol a Schrödinger macskáját abbahagytam, magával a nevezetes macskával, és John Bell bizonyításával, amely szerint, ha kvantummechanikai objektumok valamikor egyazon rendszerhez tartoztak, akkor attól kezdve mindig kapcsolatban maradnak egymással, és még akkor is valahogyan „tudnak egymásról”, amikor már eltávolodtak egymástól. Ezt Einstein „kísérteties távolhatásnak” nevezte, amit sokkal inkább „helyhez nem kötöttségként” írhatunk le. Ezek a fogalmak talán az újdonság erejével hatnak az Önök számára, ám arra is gondolhatnak, hogy tulajdonképpen ismert fogalmakról van szó. Schrödinger macskájának „paradoxona”, miszerint a macska egyszerre élő és holt, az elmúlt tíz évben szinte már közhellyé vált. Ám ha Ön úgy véli, hogy mindennel tisztában van,

amiről itt szó lesz, akkor is álljon készen arra, hogy esetleg mindent újra végig kell gondolnia. Eddig ugyanis még semmit sem látott. Minden eddiginél nagyobb és jobb paradoxonokat rejtegetek a tarsolyomban, amelyeket kifogástalan kísérletek támasztanak alá, és amelyek minden bizonnyal zavarba ejtik majd Önt. Mindezekből azonban egyetlen dolog fog kikristályosodni. Hogyan képes például egy elektron a kétréses kísérletben mindkét útvonalon egyidejűleg végigmenni? Honnan „ismeri” az elektron az adott pillanatban fennálló, teljes kísérleti elrendezést?

A kvantummechanika világának tökéletes furcsasága és a megoldandó probléma legkönnyebben úgy érthető meg, ha nyomon követjük az eredeti macskánk ikerkölykeinek, a könyvem címében szereplő kiscicáknak a sorsát. Ezután újra végig kell gondolnunk, mit is tudunk magának a fénynek a természetéről, vagyis arról a jelenségről, amely a kvantummechanikának és a relativitáselméletnek egyaránt kulcsfontosságú szereplője. Csak ezután leszek abban a helyzetben, hogy bemutathassam a valóság természetére vonatkozó újabb elképzeléseket, és megoldjuk a kvantummechanika rejtélyeit - méghozzá az összes rejtélyt. A kvantummechanika 1920-as évek közepén történt megszületése óta most először mondhatjuk el több-kevesebb biztonsággal, mit is jelent a kvantummechanika. Márpedig mi más jelenthetne elegendő indokot ennek a könyvnek a megírására, ha ez nem.

Bevezetés: A probléma

John Gribbin 1994. április

A kvantummechanika legfőbb rejtélyét a kétréses kísérlet foglalja magában. Ezt nem én mondom, hanem Richard Feynman, kora legjelentősebb fizikusa nyilatkozott így *Mai fizika* című, híres könyve kvantummechanikáról szóló kötete első fejezetének legelső oldalán. Feynman szembeállítja a kvantumfizikát Newton és az őt követő tudósok klasszikus elképzeléseivel, és kijelenti, hogy ezt a jelenséget „lehetetlen, teljességgel lehetetlen bármilyen klasszikus módon megmagyarázni”. „Ez a kvantummechanika lelke. Valójában ez jelenti az egyetlen rejtélyt.” Egy másik, *A fizikai törvények természete* című könyvében így fogalmaz: „Kiderül, hogy a kvantummechanikában bármely más helyzetet meg lehet magyarázni a következőképpen: „Emlékeznek a kétréses kísérletre? Nos, ebben az esetben pontosan ugyanarról van szó!”¹ Ezért aztán Feynmanhoz hasonlóan én is a kétréses kísérlettől indulok el, amely egymagában ül a kulcsfontosságú rejtély dicsőséges trónusán. A kísérlet ismerős, de ebben az esetben az ismerőség semmiképpen sem jelent lekicsinylést. Minél többet tudunk a kétréses kísérletről, annál rejtélyesebbnek találjuk.

Ha az iskolai fizikai laboratóriumban már találkoztunk a kísérlettel, akkor ott minden bizonnyal egyáltalán nem tűnt rejtelmesnek. Azért, mert senki sem vette

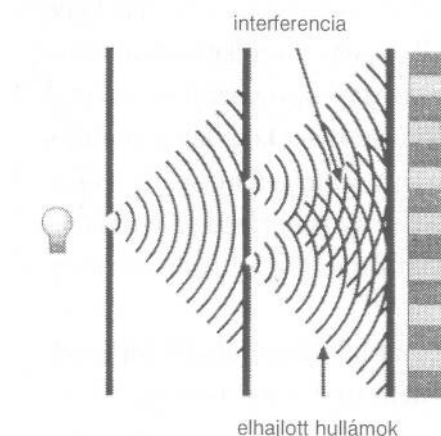
¹A továbbiakban a kvantumelmélet, a kvantumfizika és a kvantummechanika kifejezéseket egymás szinonimájaként használom. A szövegben említett könyvekre vonatkozó részletes hivatkozásokat az Irodalomjegyzék tartalmazza.

a fáradságot arra (vagy nem volt mersze hozzá), hogy megmagyarázza Önöknek a kísérlet titokzatosságát. Ehelyett - szinte magától értetődően - mindannyian azt tanulták a kartonlapba vágott két résen áthaladó fény által az ernyőn létrehozott sötét és világos sávok alkotta mintázatról, hogy az egész egyszerűen a fény hullámként történő terjedésének az ékes bizonyítéka.

Ami azt illeti, ez igaz is. A teljes igazság azonban semmiképpen sem ez.

A fantasztikus fény

A hullámok klasszikus példáját egy nyugodt vízfelszínû tavon figyelhetjük meg, amikor a vízbe dobunk egy kavicsot. A pontból, ahol a kavics a vízbe esett, kör alakú hullámok sorozata indul és terjed kifelé. Ha az ilyen hullámok egy olyan akadályhoz érkeznek, amelyen csupán két nyílás található, és a rések mindegyike jóval keskenyebb a vízhullámok hullámhosszánál, akkor az akadály másik oldalán a két nyílásból kiinduló, félkör alakú hullámok terjednek tovább. A kialakuló mintázat lényegében a fele annak, amit akkor látnánk, ha egyszerre két kavicsot ejtenénk a vízbe.



1. ábra Az első lyukból kiinduló homogén fény olyan hullámokat kelt, amelyek a második ernyőbe vágott lyukakból kiindulva azonos fázisban haladnak tovább. A hullámok egymással interferálnak, és az ernyőn sötét és világos csíkok jellegzetes mintázatát hozzák létre - ékes bizonyítékaként annak, hogy a fény hullámként terjed.

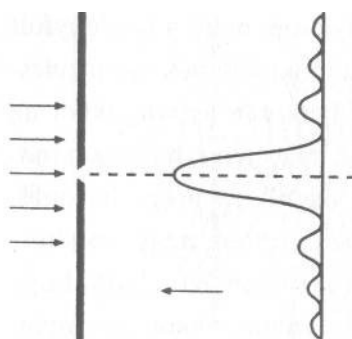
Mindenki tudja, miféle mintázat ez. Ha két kavicsot ejtünk a vízbe, akkor valójában nem kör alakú hullámok két sorozatát látjuk, amelyek keresztülhatolnak egymáson, hanem sokkal bonyolultabb mintázatot, amelyet a körhullámok egymással való interferenciája hoz létre. Bizonyos helyeken a két sorozat hullámai összeadódnak és különösen nagy fodrozódások alakulnak ki, míg másutt a vízfelszín elmozdulásai kioltják egymást, ezért a vízfelszín mozdulatlan marad.

Pontosan ugyanez történik, amikor a fény átvilágítja a kartonlapba vágott két résen, és a lap túlsó oldalán elhelyezett ernyőn valamilyen mintázatot rajzol ki. A jelenség akkor figyelhető meg a legjobban, ha egyszínű, vagyis azonos hullámhosszú sugarakból álló fényt használunk. A tó hullámaihoz hasonlóan a két lyukból itt is fényhullámok két, önálló sorozata indul ki, majd amikor a fény eléri az ernyőt, akkor kirajzolódik a sötét és világos sávokból (az ún. interferenciacsíkokból) a jellegzetes mintázat, amelyben egyes helyeken a hullámok összeadódnak (erősítő interferencia), míg másutt megszüntetik egymást (kioltó interferencia). Minden nagyon egyszerű, hiszen iskolai szintű kísérletről van szó, amelyből nemcsak a fény hullámtermészetére következtethetünk, hanem az interferenciacsíkok távolságát megmérve meglehetősen egyszerűen kiszámíthatjuk a fény hullámhosszát is.

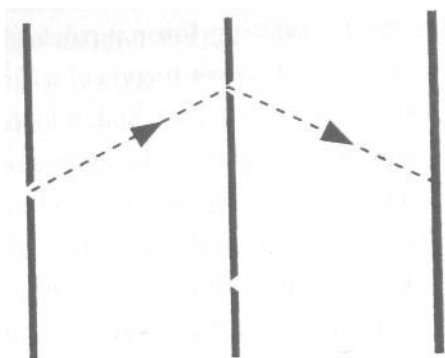
Az ördög azonban ezen a szinten is a részletekben bújkál meg. Az ernyőn megjelenő mintázat nem azonos azzal, amelyet akkor kapnánk, ha a fényt külön-külön átengednénk a két lyukon, majd a két fényfolt intenzitását összeadnánk. Ez az interferencia működésének egyik kulcsfontosságú tulajdonsága. Ha csak az egyik lyuk van nyitva, akkor az illető lyuk mögött világos fényfolt keletkezik az ernyőn; ha csak a másikon engedjük át a fényt, akkor amögött jelenik meg egy hasonló, világos folt. A két folt fényességét összeadva egyetlen, nagyobb kiterjedésű fényfoltot kapnánk. Az interferencia azonban azt jelenti, hogy amikor a fény egyidejűleg halad át mindkét lyukon, akkor az ernyőn megjelenő mintázat sokkal bonyolultabb szerkezetű lesz - nem utolsósorban azért, mert - amint az a kísérletekből kiderül - a minta legfényesebb része az ernyőn az egyenként megjelenő fényfoltok legfényesebb területei között félúton helyezkedik el, pontosan ott, ahol józan ésszel csak a sötét árnyék megjelenésére számítanánk.

Ez eddig rendben is volna. A fény tehát hullám. Sajnos ezen egyszerű kép ellenére számos, nagyon jó bizonyítékunk van arra vonatkozóan is, hogy a fény a fotonoknak nevezett részecskékből áll. Márpedig a részecskék lyukakon történő áthaladása hétköznapi tapasztalataink szerint egész másképp néz ki, mint amit a falba vágott lyukakon áthaladó hullámok esetében tapasztaltunk.

Tételezzük fel, hogy a szóban forgó lyukakat valóban, a szó fizikai értelmében egy falba vágtuk. Álljunk a fal egyik oldalára, és készítsünk magunk mellé egy nagy kupac kavicsot. Kezdjük el a kavicsokat a fal felé dobálni anélkül, hogy különösebben a lyukakra céloznánk, egyszerűen csak dobjunk minden kavicsot nagyjából a fal felé. A kavicsok némelyike átrepül az egyik vagy a másik lyukon, ennek következtében a fal túlsó oldalán két kisebb kupacba kezdenek gyűlni a kövek. A kialakuló mintázat (a két halom kavics) pontosan ugyanolyan lesz, mintha tevékenységünk első felében az egyik, majd a másik lyukat eltakartuk volna. Magától értetődően a két lyuk közötti területen, a fal megbontatlan része mögött egyáltalán nem találunk kavicsokat. A részecskék vagy az egyik, vagy a másik lyukon repülnek át, és az egyes részecskék nem lépnek kölcsönhatásba egymással.



2. ábra Az egyetlen lyukon keresztülhaladó elektronnyaláb esetében a legtöbb elektron a lyuk mögötti területre érkezik. Részecskenyaláb esetében éppen ilyen viselkedést várunk.



3. ábra Józan eszünkre támaszkodva azt tételezzük fel, hogy a két lyuk valamelyikén áthaladó elektronnak vagy fotonnak úgy kellene viselkednie, mintha egyetlen lyukon haladna át. A józan ész azt diktálná, hogy a második lyuk jelenlétének semmiféle hatása nincs arra, miként halad át a részecske az első lyukon.

Természetesen, ha egy időben sok részecske halad át a lyukakon, akkor könnyű belátni, hogy kölcsönhatásba léphetnek egymással, meglökdösik egymást, ezért a várttól eltérő mintázat alakulhat ki a fal túloldalán. Végző soron tudjuk, hogy maga a víz is részecskékből - vízmolekulákból - áll, ami nem zárja ki, hogy az akadály túloldalán is szabályos hullámok alakuljanak ki. Elképzelhető tehát az is, hogy ehhez hasonlóan a lámpából kiáramló fotonok tömege ugyanúgy viselkedik, mint a vízhullámok, amikor a gátba vágott két lyukon haladnak keresztül. A helyzet azonban akkor válik igazán rejtélyessé, amikor megvizsgáljuk, mi történik, ha a fotonokat egyenként engedjük be a két rést tartalmazó kísérleti elrendezésünkbe.

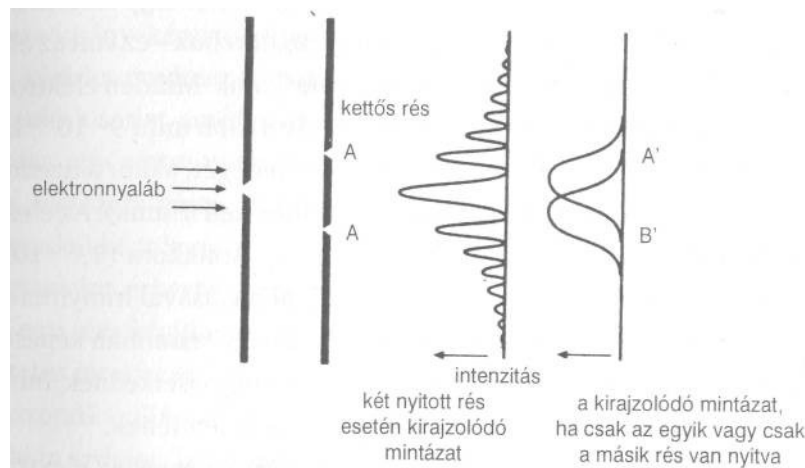
Fontos hangsúlyozni, hogy ezt a kísérletet az 1980-as évek közepén egy Párizsban dolgozó kutatócsoport valóban elvégezte. Ténylegesen sikerült megfigyelniük, amint a fotonok egyenként áthaladnak a kétréses kísérleti elrendezésen - és önmagukkal interferálnak. Amikor megírtam a Schrödinger macskáját, nagyon meggyőző, bár akkor még csak közvetett bizonyítékok álltak rendelkezésünkre arra vonatkozóan, hogyan viselkedik a fény ilyen körülmények közt. Ma viszont már a legcsekélyebb kétség nélkül, pontosan tudjuk, mi történik, ha egyetlen foton halad át a kísérleti rendszeren.

Valójában természetesen csak azt a mintázatot tudjuk megfigyelni, ami az ernyőn megjelent, miután a foton áthaladt a két lyukon. Képzeljük el, hogy a fényforrás erősségét olyannyira lecsökkentjük, hogy egyszerre csak egy foton tartózkodik a rendszerben, vagyis a következő foton csak akkor hagyja el a lámpát, amikor az előző már elérte az ernyőt (pontosan ezt teszik a kísérletet elvégző fizikusok, bár a trükk alkalmazásához roppant ügyességre és felettébb bonyolult berendezésre van szükség). Képzeljük el továbbá, hogy a két lyukat tartalmazó ernyő túloldalán elhelyezett érzékelőnk egy olyan fényképezőlemez, amelyiken minden egyes foton beérkezésének a helyén egy fehér folt keletkezik. Amikor az egyes fotonok áthaladnak a berendezésen, minden esetben pontosan azt látjuk, amire számítottunk - egyetlen foton hagyja el a lámpát, és érkezésekor egyetlen fehér pötty tűnik fel a fényképezőlemezen. Amikor azonban először fotonok százai, majd ezrei, végül milliói haladnak át a rendszeren, fantasztikus látvány tárul a szemünk elé. Az ernyőn megjelenő fehér pontok egyre inkább azon fényes sávok helyén sűrűsödnek, amelyek a hullám típusú interferencia esetén megjelennek, míg a sötét csíkok helyei üresek maradnak.

Bár minden egyes foton részecskeként indul, és részecskeként érkezik, mégis úgy tűnik, mintha egyidejűleg mindkét lyukon áthaladt volna és önmagával interferenciára lépett volna, vagyis kiszámította volna, pontosan hová kell érkeznie a képernyőn ahhoz, hogy a maga szerény módján hozzájáruljon a végső interferenciakép kialakításához. Ez a viselkedés két szempontból is rejtélyes. Először is, hogyan képes egyetlen foton egyidejűleg mindkét lyukon áthaladni? Másrészt, még ha képes is végrehajtani ezt a trükköt, honnan „tudja”, hová kell elhelyeznie magát a rendszer egészében? Miért nem halad minden egyes foton pontosan ugyanazon az útvonalon, és miért nem érkezik az összes az ernyőnek ugyanazon pontjába?

Nos, bármilyen titokzatosnak is tűnik mindez, megpróbálhatunk arra hivatkozni, hogy esetleg a fénynek van valamilyen furcsa tulajdonsága. Ez valóban így is van. A fény (pontosabban szólva az elektromágneses sugárzás) mindig azonos sebességgel halad, a c -vel jelölt fénysebességgel. Akár mi mozgunk, akár a fényforrás, ha megmérjük a fény sebességét, mindig ugyanazt az értéket kapjuk eredményül. Ennek a felismerésnek alapvető következményei vannak, amelyekkel majd akkor találkozunk, amikor a relativitáselméletet fogjuk tárgyalni. Kétségtelen, hogy hétköznapi világunkban semmi sem viselkedik ehhez foghatóan. Ráadásul a fotonoknak nincs tömegük, ami további furcsa, és józan ésszel felfoghatatlan tulajdonságuk. Talán a fotonok rejtelmes viselkedése a kétréses kísérletben annak a ténynek tudható be, hogy nincs tömegük és

fénysebességgel száguldanak? Vagy esetleg a fénynek valamilyen további, hasonlóan rejtelmes tulajdonságáról van szó? Ralph Baierlein megfogalmazása szerint „a fény hullámként halad, de részecskeként indul és érkezik”.² Talán mindez csak egyike a fény számtalan, különleges tulajdonságának?



4. ábra Az elektronok és a fotonok egyaránt úgy viselkednek, mintha tudnának a másik lyuk jelenlétéről. Ha mindkét rés nyitva van, egészen más mintázat rajzolódik ki az ernyőn, mintha csak az egyik, majd csak a másik rés lenne nyitva, és a két eredményt összeadnánk. Vajon ez azt jelenti, hogy az elektron valójában hullám?

Sajnos egyáltalán nem ez a helyzet. Pontosan ugyanezt a trükköt elektronokkal is végre lehet hajtani - amelyek ugyan nem hasonlítanak azokhoz a részecskékhez, amelyekkel a mindennapi életben találkozunk, mégis nemcsak tömegük, hanem elektromos töltésük is van, arról nem is beszélve, hogy a körülményektől függően különböző sebességgel képesek mozogni. Ennek ellenére az elektronok ugyancsak hullámként terjednek, ám szintén részecskeként indulnak és érkezik. Márpedig ezt már nem lehet elintézni azzal, hogy csupán egyedi esetről van szó.

Az elektronok interferenciája

Az elektron határozottan a részecskék világába tartozik. Az elektront először 1897-ben a Cambridge-i Cavendish Laboratóriumban dolgozó J. J. Thomson azonosította. Thomson bebizonyította, hogy az elektronok az atomokból kiszökő vagy kiszakadó anyagdarabok - ez volt az első bizonyíték arra, hogy az atomok nem oszthatatlanok. Minden elektronnak pontosan ugyanakkora a tömege (valamivel több mint $9 \cdot 10^{-31}$ kg, vagyis ha kg-ban akarjuk kifejezni az elektron tömegét, akkor a tizedesvessző és a 9-es közé nem kevesebb, mint 30 nullát kell írunk). Az elektronok elektromos töltése is mindig pontosan ugyanakkora ($1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb). Elektromos és mágneses erőter alkalmazásával irányíthatóak, és a rájuk ható erőktől függően gyorsabban vagy lassabban képesek mozogni. Nagyon sok szempontból az elektronok úgy viselkednek, mintha parányi,

²Baierlein: Newton and Einstein, 170. oldal.

elektromos töltést hordozó golyócskák lennének.

Ennek ellenére az 1920-as évek végére, vagyis 30 évvel az elektron felfedezése után, nyilvánvalóvá vált, hogy az elektronok hullámként is viselkedhetnek. Az egyik kutató, aki ezt 1927-ben bebizonyította, éppen J. J. fia, George Thomson volt. Az elektron kettős természetére, az úgynevezett hullám-részecske kettősségre (dualizmusra) vonatkozó bizonyítékok már jóval az 1980-as évek előtt teljes mértékben elfogadottá váltak. Ennek ellenére csak 1987-ben sikerült egy japán kutatócsoportnak elektronokkal ténylegesen végrehajtania a kétréses kísérletet.

Ezt megelőzően a szakkönyvek (beleértve Feynmanét is) és a népszerű könyvek (többek közt e sorok írójáé) megemlítették ezeket a kísérleteket, és határozottan biztosították az olvasót, hogy bár ezek csupán az elektron mindenki által ismert tulajdonságain alapuló „gondolatkísérletek”, mégis nyugodtan megjósolhatjuk, hogyan fognak viselkedni, ha szembe találják magukat a falba vágott két lyukkal. Végül is éppen 90 évvel az elektron részecskeként történt felfedezése után, és 60 évvel a hullámként azonosításuk után sikerült a Hitachi kutatólaboratóriuma és a tokiói Gakushuin Egyetem kutatóinak elektronokkal is végrehajtani a kétréses trükköt.

Kísérletükben a kettős rést egy elektron-kettősprizmának nevezett eszközzel hozták létre. A fal másik oldalán egy tévéképernyőn fogták fel a beérkező elektronokat, amelyen minden egyes elektron beérkezése a képernyőn megmaradó fényfoltot keltett. Az egymást követő elektronok beérkezése tehát lépésről lépésre kirajzolta a képernyőn a kísérlet eredményeképpen adódó mintázatot.

A kísérlet eredménye pontosan az volt, amire a fotonokkal végzett hasonló kísérlet analógiája alapján számítani lehetett. Az elektronok forrása egy elektronmikroszkópban elektronforrásként használt csúcs volt, ami szabványos, és jól ismert tulajdonságú eszköz. Az elektronok részecskéként hagyták el az „elektronágyú” csúcsát, és ugyancsak részecskéként érkeztek meg a túloldalon elhelyezett képernyőre, ahol egy-egy fényfelvillanást váltottak ki. A képernyőn ennek ellenére jellegzetes interferenciakép rajzolódott ki, ami azt bizonyította, hogy az elektronok hullámként haladtak át a lyukakon.

Talán érdekes lehet még alaposabban körüljárni az elektronnak ezt a furcsa viselkedését. Végül is nem tudunk kézbe venni egyetlen elektront. Soha senki nem látott még elektront, csupán azokat a fényfoltokat láthatjuk, amelyeket az elektronok erre érzékeny képernyőbe csapódása vált ki. Ugyanakkor hétköznapi tapasztalatunkból azt is tudjuk, hogy ha kavicsokat dobálunk át lyukakon, akkor nem alakul ki a különös interferenciakép. Sem a kavicsok, sem a labdák, sem a minket körülvevő, hétköznapi világ egyetlen más tárgya sem mutatja ezt a különös, hullám-részecske kettősséget.

Nos, a fizikusok erre is tudnak válaszolni. Ha azt akarjuk látni, amint az elegendően nagy részecskék ugyancsak hullámjelenségeket mutatnak, amikor

keresztülhaladnak a kétréses kísérleten, akkor a fizikusok ezt is meg tudják mutatni nekünk.

A szóban forgó részecskék atomok. El kell ismerni, hogy atomokat sem láthatunk a saját szemünkkel, de még csak a tenyerünkre sem tehetünk egyetlen atomot. Ennek ellenére az egyes, mágneses térrel kordában tartott atomokat ma már le lehet fényképezni. Ez az eredmény (amelyről például Hans von Baeyer a *Taming the Atom* című könyvében számol be) annál is inkább jelentős, mert az atomok fogalma a tudósok körében csak a XX. század elején vált teljes mértékben elfogadottá. Valójában Albert Einstein a doktori értekezésében mutatta ki - egyebek között -, hogy az atomok valóságosan létező dolgok. Bár az atomok sokkal nagyobbak az elektronoknál, hétköznapi foglmaink szerint még mindig elképzelhetetlenül parányiak. Egy szénatom tömege például nem egészen $2 \cdot 10^{-26}$ kg, ami azonban huszonkétezerszerese az elektron tömegének. Az atomok átmérője körülbelül a milliméter tízmilliomod része, ami azt jelenti, hogy a postabélyegek szegélyén lévő fogak mindegyikén tízmillió atom férne el egymás mellett. Az egyes atomokat azonban még soha nem sikerült lefényképezni, képük nem jeleníthető meg „élő adásban” a tévé képernyőjén.

A kétréses kísérletet atomokkal csak az 1990-es évek elején sikerült először elvégezni. A Konstanzi Egyetem (Németország) kutatócsoportja héliumatomokat engedett át aranyfóliába vágott, 1 mikrométer (a méter milliommód része) széles réseken. A detektort a fólia túloldalán helyezték el. Ebben az esetben az interferenciakép felépülését nem lehetett közvetlenül egy tévéképernyőn figyelemmel kísérni, de a detektor ernyőjének egyes pontjaira érkező héliumatomok számát pontosan meg tudták mérni. Az eredményekből a jól ismert interferenciakép rajzolódott ki. Az atomok tehát ugyancsak hullámként haladnak, de részecskeként érnek célba.

Több más kutatócsoport is beszámolt az 1990-es évek elején hasonló eredményekről. Az egyik, az MIT-n (a Massachusettsi Műszaki Egyetemen) dolgozó, nátriumatomok nyalábját használta. Az eredmények minden egyes kísérletben azonosak voltak. A kétréses kísérleti elrendezésen áthaladó minden egyes atom mindkét útvonalon egyidejűleg végigmegy miközben önmagával interferál. Úgy tűnik, hogy egy atom egyszerre két helyen is lehet (mindkét lyukban egyidejűleg).

Újabb és (egyelőre legalábbis) végső csavar a témában, amiről az Egyesült Államok Nemzeti Szabványügyi és Technológiai Intézetének (Boulder, Colorado) és a Texas Egyetemnek a kutatói 1993-ban számoltak be, akik ezt a kísérletet a feje tetejére állították. Ahelyett, hogy atomokat küldtek volna át a két résen, mágneses térrel atompárokat ejtettek csapdába, és lényegében ezeket az atomokat „résekként” használva fénysugarakat ejtettek rájuk. A visszaverődő fényt vizsgálva megfigyelték a kialakuló interferenciaképet. Az atomokról visszaverődő fényhullámok nagyon hasonló viselkedést mutattak, mint a kétréses kísérletben a rések mögött szétterjedő hullámok. A kísérletnek ez az újabb változata természetesen csak azért működik, mert az atomok részecskék, amelyek mágneses térrel csapdába ejthetők, és amelyeken a hullámok szóródni

tudnak. Nem létezik a hullám-részecske kettősségre annál tisztább példa, mint a kísérleteknek ez a kombinációja, amelyben az atomok - vagyis, emlékezzünk csak vissza, lefényképezhetően nagyméretű részecskék - és az interferencia egyaránt szerephez jutnak.

Minthogy ezek a különleges jelenségek a kövek, a labdák vagy más, kézzelfogható és szabad szemmel látható tárgyak esetében nem mutatkoznak meg, kell lennie valahol egy határnak, amely fölött a kvantummechanika jelenségei már rejtve maradnak. Valahol az atomok és az emberi lények mérete közötti tartományban a kvantummechanikai szabályok kikapcsolnak, és átadják a helyüket a klasszikus fizika törvényeinek. Ebben a könyvben később fogjuk csak elmondani, hol ez a határ, és miért következik be az említett váltás. A válaszok alapvetően rengetik meg a valóságról alkotott képünket.

E helyütt egyelőre csak azt kell újra meg újra hangsúlyozni, hogy mindezeket a kísérleteket már ténylegesen elvégezték. Az eredmények nem lepték meg a fizikusokat. Az 1930-as évek bármely jól képzett fizikusa meg tudta volna jósolni ezeket az eredményeket a kvantummechanika törvényei alapján. Előfordulhatott volna azonban, hogy a kísérletek mégsem a várt eredményre vezetnek - vagyis a kvantummechanika esetleg hibásnak bizonyulhatott volna. De nem ez történt. Amikor az 1980-as évek végén és az 1990-es évek elején elvégezték a rejtélyek legmélyére hatoló kísérleteket, a kapott „válaszok” tökéletes összhangban voltak a kvantummechanika jóslataival. Lássuk tehát, miként ad számot a kvantumfizika ezekről a sajtóságos magatartásokról!

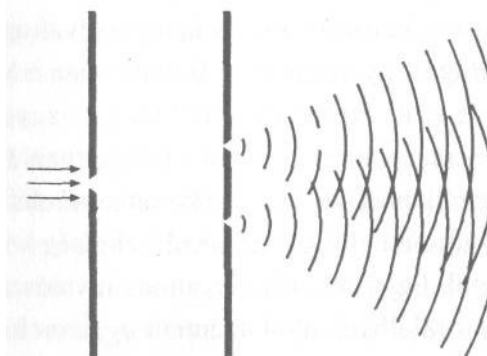
A hagyományos kép

A kvantumvilág eseményeinek hagyományos értelmezése az úgynevezett koppenhágai értelmezés, mert azt legnagyobbbrészt a Koppenhágában dolgozó Niels Bohr dán fizikus alkotta meg. A munkához mások is jelentős mértékben hozzájárultak, többek közt a német Werner Heisenberg és Max Born, ám mindvégig Bohr volt az értelmezés leglelkesebb szószólója. A teljes csomag lényegében 1930-ra készült el, tehát alig egy emberélettel ezelőtt. Azóta ez képezte lényegében minden gyakorlati munka alapját a kvantumvilágban, és ez az a történet, amelyet a főiskolákon és az egyetemeken a jövő fizikusainak is megtanítanak. A felfogás azonban néhány meglehetősen hajmeresztő alapfogalomra épül.

Az elgondolás kulcsszerepet játszó fogalma az úgynevezett „hullámfüggvény összeomlása”. Amikor Bohr és munkatársai arra próbáltak magyarázatot adni, miként tud egy objektum, például egy foton vagy egy elektron „hullámként” haladni és részecskéként megérkezni”, akkor kijelentették, hogy ez azért történhet meg, mert a megfigyelés hatására a hullámfüggvény összeomlik, és a hullám részecskévé válik. Ezt látjuk megvalósulni a kétréses kísérlet elektronokkal végzett változatában - az elektron hullámként halad át a kísérleti berendezésen, majd a detektor képernyőjén egyetlen ponttá „omlik össze”.

Ez azonban csak egy része a történetnek. Hogyan képes egyetlen elektron hullámként önmagával interferálni, és hogyan választja ki a képernyőnek azt a pontját, ahol össze kell omlania? A koppenhágai értelmezés szerint ez arra vezethető vissza, hogy a kísérleti eszközön tulajdonképpen csak egy valószínűségi hullám halad keresztül, nem pedig maga az anyaghullám. A kvantummechanikai hullámok mozgását leíró - az osztrák Erwin Schrödinger által levezetett - egyenlet nem egy, a tó vizének fodrozódásához hasonló anyaghullám viselkedését írja le, hanem lényegében annak a valószínűségét, hogy a foton (vagy az elektron vagy bármilyen más részecske) egy adott helyen található.

A legnagyobbbrészt Born munkáján alapuló kép szerint a meg nem figyelt elektron a szó szoros értelmében nem is létezik részecske formájában. Bizonyos valószínűsége van annak, hogy az elektron itt található, más valószínűséggel ott lehet megtalálni, de elméletileg az elektron a Világegyetemben szó szerint bárhol felbukkanhat. Egyes helyeken nagyon valószínű az előfordulása - például a kétréses kísérlet fényes sávjaiban -, míg más helyeken nagyon valószínűtlen a megjelenése, például a sötét sávokban. Valójában azonban lehetséges, bár felettébb valószínűtlen, hogy az elektron az interferenciakép helyett a Marson vagy a szomszéd tévékészülékének képernyőjén bukkanjon fel.



5. ábra A 4. ábrán bemutatott rejtély hagyományos magyarázata szerint a „valószínűségi hullámok” mindkét nyíláson áthaladnak, és meghatározzák, hol kell az egyes részecskenyaláboknak végződnie. A valószínűségi hullámok ugyanúgy interferálnak egymással, ahogyan a víz hullámok.



6. ábra Amikor azonban részecskéket keresünk, akkor részecskéket találunk (esetünkben A-t és B-t)! A valószínűségi hullámok meghatározzák, hol vannak a részecskék, magukat a hullámokat azonban soha nem látjuk. Valójában nem tudjuk, mi halad végig a kísérleti berendezésen. E különös viselkedés nyomán támadt az a szófordulat, miszerint az elektron (vagy foton) „hullámként halad, de részecskeként érkezik meg”.

Amikor azonban az elektront megfigyeljük, megváltoznak a valószínűségek. A hullámfüggvény összeomlik (talán éppen a Marson, ha valaki ott figyelné meg az elektront, de ennél sokkal nagyobb valószínűséggel az interferenciaképben), és abban a pillanatban 100 százalékos bizonyossággal megállapítható, hol tartózkodik az elektron. Mihelyt azonban abbahagyjuk a megfigyelését, a valószínűség kezd elszivárogni az említett helyről. Egyre kisebb lesz annak a valószínűsége, hogy az elektron ugyanott található, ahol az imént egészen bizonyosan láttuk, és lassan nőni kezd annak a valószínűsége, hogy az elektron éppen valahol másutt van, vagyis a hullámfüggvény szétterjed az egész Világegyetemben.

Bár furcsán hangzik, a koncepció a gyakorlatban mégis nagyon hasznosnak bizonyult, mert a gyakorlati alkalmazások mindegyikében - akár tévékészüléket akarunk építeni, akár integrált áramkört a számítógépünkbe - igen nagy számú elektronnal dolgozunk. Ha ezek mindegyike a valószínűségszámítás és a statisztika szigorú szabályainak engedelmeskedik, akkor az elektronok nagy tömegének együttes viselkedése előre jelezhető. Ha például tudjuk, hogy a számítógépünk valamelyik áramkörében az elektronok 30 százaléka az egyik, 70 százaléka pedig a másik útvonalon halad, akkor nem kell azzal törődnünk, hogy az egyes elektronok közül melyik merre megy. Hasonlóképpen, a kaszinó tulajdonosa számára is hosszú távon a valószínűségi törvények biztosítják a hasznot, még akkor is, ha néha egyik vagy másik szerencsés játékos nagy nyereményt vághat zsebre a ruletten. Albert Einstein azonban nagyon nem kedvelte a valószínűség fogalmát, amit híressé vált mondásában így fogalmazott meg: „Nem tudom elhinni, hogy Isten szerencsejátékot játszana a Világmindenséggel.” A következmények nyilvánvalóak, amikor eljutunk az egyetlen elektronnal vagy egyetlen fotonnal végzett kísérletekig.

Az egyik nyilvánvaló tény akkor ötlik a szemünkbe, amikor újra végiggondoljuk a kétréses kísérletet. A kísérletnek ezt a változatát még nem hajtották végre egyetlen elektronnal, azonban az ennél valamivel bonyolultabb kísérletek megerősítették, miként viselkednek az elektronok, ezért semmi kétségünk sem lehet afelől, hogyan is viselkednének az elektronok, ha valóban el tudnánk végezni a kísérletet ebben a tiszta formájában.

Először is emlékezzünk vissza arra, mi történt az interferenciaképpel (amelyet akár fotonok, akár elektronok hoztak létre), ha az egyik rést bezártuk. Ilyenkor az interferenciaminta eltűnik. Nyilvánvaló, hogy amikor csak egy rés van nyitva,

akkor az elektron csakis ezen a résen haladhat keresztül, hogy elérje a felfogóernyőt. Ez azonban még akkor is elég különös, ha az elektronokat egyszerűen csak részecskéknek tekintjük. Honnan „tudja” az egyik lyukon áthaladó elektron, hogy a másik lyuk nyitva van vagy sem? A kétréses kísérlet egyik nyílásán áthaladó egyszerű részecske sohasem tudhatja, és nem is törődhet vele, hogy a másik lyuk nyitva van vagy zárva. Ha azonban a kísérletet úgy építjük fel, hogy a második nyílás nyitva (vagy zárva) legyen, abban a pillanatban, amikor az elektron elhagyja az elektronagyút, de rögtön ezután zárjuk be (nyissuk ki), még mielőtt az elektron eléri az első rést, akkor az elektronnak „ki kell választania” a megfelelő útvonalat ahhoz, hogy elérje az ernyőt és ott éppen a megfelelő mintázat kialakulásához járuljon hozzá. Tervezhetünk olyan kísérletet is, amelyikben a második rést véletlenszerűen nyitogatjuk és csukogatjuk. Minden egyes elektron attól függően választja meg az egyik résen keresztülvezető pályáját, hogy ugyanabban a pillanatban a másik rés éppen nyitva van vagy zárva.

Úgy tűnik, mintha az elektronok pontosan tisztában lennének a közvetlen környezetüknél tágabb világ fizikai állapotával. Nemcsak az egyik lyuk állapotát ismerik, hanem a kísérleti elrendezés egészét. Ez a helyhez nem kötöttség alapvető jelentőségű az egész kvantummechanikában, ugyanakkor ez az, ami annyira aggasztotta Einsteint. Innen ered a tőle származó „kísérteties távolhatás” kifejezés, bár amikor először tette ezt a kijelentést, akkor a helyhez nem kötöttség egy még sokkal furcsább megnyilvánulására gondolt, amire rövidesen ki fogunk térni.

Eddig azonban minden bizonyítékunkat olyan kísérletek eredményeiből eredeztettük, amelyekben megfigyeltük, milyen minta rajzolódik ki a detektoron, miközben a zárt és nyitott részek különböző kombinációival operáltunk. De vajon miért nem próbáljuk megtudni, mi történik magukban a lyukakban? Képzeli el, hogy a kísérlet mindkét rése mellett elhelyezünk egy-egy detektort, majd elkezdjük egyenként átküldeni a rendszeren az elektronokat. Nos, ebben az esetben vagy azt láthatnánk, hogy az elektron mindkét lyukon egyszerre megy át, ahogyan ez egy hullámtól elvárható, vagy csak az egyik, vagy csak a másik lyukon megy át (esetleg mindkét lyukon átmegy egy fél elektron). Eközben persze rápillanthatunk a detektor ernyőjére is, és megfigyelhetjük, milyen kép rajzolódik ki ott, miközben nagyszámú elektron megy át a rendszeren. Ebben az elrendezésben azt fogjuk megállapítani, hogy minden egyes elektron mindig részecskének látszik, amelyik vagy az egyik, vagy a másik résen megy át. Az elektronok apró golyókként viselkednek. Ráadásul, akár hiszik, akár nem, az interferenciakép eltűnik. A képernyőn megjelenő minta pontosan olyan lesz, amilyent a két lyukon, egymástól teljesen függetlenül áthaladó lövedékek hoznak létre (vagy amilyen eloszlást a falba vágott nyílásokon átdobált kavicsok esetében kaptunk). Az elektron hullámfüggvénye a megfigyelés hatására összeomlott, ezért az elektron abban a kritikus pillanatban, amikor áthaladt a lyukon, részecskeként viselkedett. Ne gondoljuk azonban, hogy ezzel kimenekültünk a helyhez nem kötöttség rejtélyéből. Valójában az is elég, ha egyszerűen csak rápillantunk az egyik lyukra, és máris megváltozik a kapott mintázat. Ha így teszünk, akkor kizárólag golyószerű elektronokat fogunk látni a réseken átmenni, az ernyőn

pedig a független részecskékre jellemző eloszlást figyelhetjük meg. A második résen áthaladó elektronoknak valahogyan a „tudomásukra jut”, hogy szemmel tartjuk az első részt, amelynek eredményeképpen ők is részecskékként viselkednek.

Ezenkívül ki kell térnünk a koppenhágai értelmezés valószínűségi vonatkozásaira is. Feltételezve, hogy a kísérleti berendezést tökéletesen szimmetrikusra építettük, megállapítható, hogy az elektronok pontosan fele választotta a két lehetséges útvonal mindegyikét. Az elektronok 50 százaléka megy át az egyik, és ugyancsak 50 százaléka a másik nyíláson. Nem áll módunkban előre egyenként megjósolni, melyik elektron melyik résen fog átmenni, így azt sem, hogy a detektor ernyőjének melyik foltjára érkezik. Hasonlóan egy érme feldobása esetén kapott fejek sorozatához, itt is előfordulhat, hogy véletlenszerűen egymás után több elektron ugyanazon a résen megy át. Miután azonban már egymillió elektron haladt át a kísérleten, miközben megszakítás nélkül figyeltük a réseket, bizonyosak lehetünk benne, hogy félmillió elektron nyoma hozta létre az egyik, és ugyancsak félmillióé a másik fényfoltot. A valószínűségi hullám tehát továbbra is teszi a dolgát, annak ellenére, hogy szemmel tartjuk az elektronokat, és ezért azok részecskékként viselkednek.

Bohr érvelése szerint nem az egyes elektronok viselkedése számít, de még csak nem is az egymillió elektron viselkedése. Szerinte a lényeg maga a teljes kísérleti elrendezés, beleértve az elektronokat, a két részt, a detektor ernyőjét és a megfigyelő embert. Lehetetlen kijelenteni, hogy az elektron hullám, vagy hogy az elektron részecske. Csupán annyit jelenthetünk ki, hogy ha a kísérletet egy bizonyos módon állítjuk össze, és meghatározott méréseket végzünk el, akkor meghatározott eredményt fogunk kapni. Ha hullámok mérésére tervezzük a kísérletet, akkor interferenciaképet látunk, ha viszont a lyukakon áthaladó részecskéket akarunk megfigyelni, akkor a lyukakon áthaladó részecskéket fogunk látni. Akár meg is várhatjuk, amíg az elektronok elhagyják az „ágyút”, és csak utána döntjük el, bekapcsoljuk-e a rés peremére szerelt detektorainkat; a kísérlet végeredménye (az ernyőn kirajzolódó mintázat) minden esetben a teljes kísérleti elrendezéstől fog függeni. Márpedig a kvantumvilágnak ez a holisztikus képe a filozófia mély vizébe vezet el bennünket.

Mély víz

A koppenhágai értelmezés több mint 50 éven keresztül uralkodott, 1930-tól az 1980-as évek csaknem közepéig. A fizikusok döntő többsége nem helyezkedett szembe vele. Nem törődtek azokkal a mély filozófiai következményekkel, amelyek a koppenhágai értelmezéshez kapcsolódnak - valójában sokan még ma sem törődnek vele -, csak arra figyeltek, hogy az, mint gyakorlati eszköz, alkalmas-e a kísérletek eredményeinek előre jelzésére. Az utóbbi években azonban egyre többeknek volt rossz érzésük azzal kapcsolatban, mit is „jelent” a kvantummechanika, ezért egyre nagyobb erőfeszítéseket tettek alternatív értelmezések megalkotása érdekében.

Az egész ügyben a legnagyobb problémát a hullámfüggvény összeomlása jelenti.

Bohr világosan az értésünkre adja, hogy a kísérlet egészét kell figyelembe venni, és a hullámok összeomlásának a módja a teljes kísérleti elrendezéstől függ; ám a tiszta, csakis önmagát tartalmazó kísérlet nem létezik. A kvantumelméletnek ez az értelmezése azt állítja, hogy minden objektum, például egy elektron, csak annyira valóságos, amennyire megfigyeljük, illetve, hogy a mérőberendezés bizonyos értelemben „valóságosabb”, mint a fotonok, az elektronok és minden egyéb. Ez nem az én értelmezésem a koppenhágai értelmezésre; ez az, amit Bohr, Heisenberg és kollégáik explicit módon kijelentettek. Heisenberg például kijelentette: „A koppenhágai értelmezés a klasszikus fogalmakkal leírható dolgokkal és folyamatokkal foglalkozik, vagyis az aktuális világgal, mint minden fizikai értelmezés alapjával.”³ Más szavakkal ez úgy is megfogalmazható, hogy az atomok, amelyekből az egész klasszikus világ felépül, valamiképpen kevésbé valóságosak, mint az atomokból felépülő dolgok. Ez már az 1930-as években is sokak számára megrázó, mert egyenesen természetfölöttinek tűnő kijelentés volt, még nehezebb azonban megemészteni napjainkban, amikor az atomokat már le is tudjuk fényképezni.

Ha ezt az érvelést - tehát a koppenhágai értelmezést - a kétréses kísérlet értelmezésére alkalmazzuk, akkor eszerint valakinek figyelnie kell a kísérlet lefolyását, ha egy meghatározott állapotot akarunk eredményül kapni. Ezt Heinz Pagels, aki akkoriban (1981) a New York-i Tudományos Akadémia elnöke volt, és természetesen pontosan értette, miről is szól a kvantummechanika, a következőképpen fogalmazta meg: „Nincs értelme a tényleges megfigyeléstől függetlenül egy elektron objektív létezéséről beszélni a tér egy adott pontjában, például a két rés egyikében. Úgy tűnik, hogy az elektron akkor válik hirtelen valóságos objektummá, amikor megfigyeljük!”⁴ Ám a kísérletező nemcsak a kísérletnek, hanem a kísérleten kívüli világnak is része. Az emberek egyebek között elektronokból épülnek fel. Minek a hatására omlik össze ezeknek az elektronoknak a hullámfüggvénye, hogy a kísérletező testében lokalizált objektumokként viselkedjenek? Feltételezhetően ez a kísérletezőn kívüli, külső világ hatására történik. És akkor mi teszi a kísérletezőn kívüli világot ebben az értelemben „valóságossá”? További kölcsönhatások további dolgokkal (köztük újabb megfigyelőkkel), egyre nagyobb és nagyobb léptékben. Vegyük csak szó szerint a koppenhágai értelmezést, akkor azt az üzenetet kapjuk, hogy az elektron hullámfüggvénye azért omlik össze, és az elektron azért hoz létre pontszerű nyomot a detektor képernyőjén, mert az egész Világegyetem őt figyeli. Ez meglehetősen furcsán hangzik, bár egyes kozmológusok (köztük Stephen Hawking) azon aggódnak, hogy ennek következményeképpen léteznie kell valaminek „a Világegyetemen kívül”, ami a Világegyetem egészét figyeli, hogy ennek hatására a Világegyetem hullámfüggvénye is összeomoljon.⁵ Ezzel szemben John Wheeler érvelése szerint csak a tudatos megfigyelők, például mi magunk, jelenléte az, aminek hatására összeomlik a Világegyetem

3 Wézi: Nick Herberts a Paul Davies által szerkesztett, *The New Physics* című összeállításban (Cambridge: Cambridge University Press, 1989), 143. oldal.

4 Pagels: *The Cosmic Code*, 144. oldal.

5Lásd például Hawking: *Az idő rövid története* című könyvét, valamint saját, *In Search of the Big Bang* című munkámat.

hullámfüggvénye, és ettől létrejön a Világegyetem. Eszerint tehát a Világegyetemben minden csak azért létezik, mert mi megfigyeljük. Ezeket a kétségbeesett próbálkozásokat és a reménytelenségben fogant tanácsokat a későbbiekben részletesebben is szemügyre vesszük, mindamellett az a tény, hogy efféle érvelések tekintélyes tudósok írásaiban, komoly formában napvilágot látnak, elegendő annak érzékeltetésére, milyen mély vizekre kalandoztunk máris el.

Egy másik probléma a kvantummechanikai objektumok részecskeként és hullámként történő viselkedése közötti kapcsolatra vonatkozik. Bohr ezeket komplementer tulajdonságokként írta le, ugyanazon értelemben, amint egy pénzérme fej és írás oldalai is komplementerei egymásnak. Ha egy érmét az asztalra fektetünk, akkor vagy a fej, vagy az írás van felül, a kettő egyszerre nem lehetséges. A koppenhágai értelmezés szerint egy objektum, például egy elektron soha nem hullám, sem nem részecske, hanem valami más, olyasmi, amit a hétköznapi fogalmainkkal nem vagyunk képesek leírni. Mindamellett ez az objektum hol a hullám arcát, hol a részecske arcát mutatja felénk, attól függően, hogy milyen kísérletet szeretnénk vele elvégezni - vagyis mi döntjük el, hogy a kvantummechanikai pénzérme melyik oldalával fölfelé fekszen az asztalon. Valójában az elektronnak lehetnek további tulajdonságai is, amelyek megméréséhez nem vagyunk elég ügyesek, és ennél fogva ezekről a tulajdonságokról nem is tudunk semmit.

Ez a komplementaritás, vagyis hullám-részecske kettősség a Heisenberg által felfedezett, híres határozatlansági relációval áll kapcsolatban. Az elv a legegyszerűbb formájában azt állítja, hogy valamely kvantummechanikai objektumnak nem lehet egyidejűleg a helyét is és az impulzusát is pontosan megmérni. Az impulzus egyszerűen annak a mértéke, hogy az adott test merrefelé és milyen gyorsan mozog. Az impulzus sok szempontból hullámtulajdonságnak is tekinthető, hiszen a hullámoknak is tartaniuk kell valamerre, máskülönben nem lennének hullámok. A hely ezzel szemben egyértelműen részecsketulajdonság - a hullám természetéből adódóan szétterjed, míg a részecske egy adott helyhez kötött. Elvégezhetünk bizonyos méréseket, amelyekkel meghatározhatjuk egy elektron helyét, míg más mérésekkel megmérhetjük a sebességét, és bármelyik mérést tetszés szerinti pontossággal végezhetjük el. Ám ha nagyon pontosan akarjuk megmérni a helyét, akkor a sebessége szükségszerűen és számszerűen megadható mértékben elmosódottá válik és viszont.

Egyes kézikönyvek téves állításával ellentétben ez nem kizárólag a mérés elvégzésének gyakorlati nehézségeiből adódó korlát. A mérés valóban nem egyszerű, hiszen ha például meg akarjuk mérni egy elektron helyét (például úgy, hogy fotonokat lökünk neki, és azok visszapattanását figyeljük), akkor a mérés közben óhatatlanul meglökjük egy kicsit az elektront, ami megváltoztatja az impulzusát. A kvantummechanikai objektumoknak nincs pontosan meghatározott impulzusa és pontosan meghatározott helye. Maga az elektron sem „tudja” bizonyos határokon belül, hogy hol van és merre tart. Némi túlzással, ha pontosan tudja, hol van, fogalma sincs arról, merre megy, ha viszont pontosan tudja, merre

megy, halvány fogalma sincs arról, hol van. Rendszerint azonban a kvantummechanikai objektumok megközelítő pontossággal bár, de tudják a helyüket és a sebességüket is. Ebben az állításban mindamellet a „megközelítő pontossággal” a lényeg. „Földhözragadt” gondolkodásmódunkkal aligha érthető, miért nem lehet a kvantummechanikai objektumokat odaszögezni egy meghatározott helyre, és miért van mindig valamekkora bizonytalanság a mozgásuk irányában.

Mindez kritikus jelentőségű például a magfúziós reakciók esetében, ahol a kvantummechanikai bizonytalanság teszi lehetővé, hogy a klasszikus fizikai elképzelések szerint egymással érintkezni képtelen részecskék mégiscsak átfedésbe kerüljenek és egyesüljenek. Ezen atommagreakciók némelyike tartja forrón a csillagokat. A kvantummechanikai határozatlanság nélkül a Nap sem tudna úgy sugározni, amint ezt teszi.⁶

Meglehetősen nehéz ezekkel az elképzelésekkel zöldágra vergődni, nem célom azonban, hogy végigvezessem az olvasót a kialakulásuk történetén, vagy hogy bemutassam azokat a bizonyítékokat, amelyek értelmében a kvantumvilág valóban így működik. Számos más könyv jelent már meg, többek között a sajátom is, amelyek ezekkel a részletekkel foglalkoznak. Ebben a könyvemben sokkal inkább azzal szeretnék foglalkozni, hogy hol vall kudarcot a koppenhágai értelmezés, és mi léphet a helyére. A határozatlansági reláció azonban valóban a kvantummechanika szintjén az élettől elválaszthatatlanul együtt járó ténynek tűnik. A hétköznapi életben ugyanazért nem látjuk érvényesülni, amiért a hullám-részecske kettősség sem mutatkozik meg mindennapi világunkban. Az ezeket a jelenségeket leíró egyenletek mindegyike tartalmazza a Planck-állandónak nevezett számot, amely a kvantummechanika úttörőjéről, Max Planckról kapta a nevét. A hétköznapi tárgyak tömegéhez és impulzusához képest a Planck-állandó nagyon kicsi, értéke mindössze $6,55 \cdot 10^{-27}$ erg s (ne zavarjon senkit a mértékegység; az a lényeg, hogy ebben az esetben a tömeget grammban mérjük). A kvantummechanikai hatások csak olyan objektumok esetében válnak meghatározóvá, amelyek tömege körülbelül ebbe a nagyságrendbe esik - ilyen például az elektron a maga $9 \cdot 10^{-31}$ kg, vagy az előző adattal a közvetlen összehasonlíthatóság kedvéért $9 \cdot 10^{-28}$ g tömegével. Ha az atomoknál jóval nagyobb tömegű testekkel foglalkozunk, akkor a kvantummechanikai hatások olyan kicsik, hogy nyugodtan elhanyagolhatók - kivéve azt a tényt, hogy minden, ami az atomoknál nagyobb, maga is atomokból áll.

Érdemes most egy lélegzetvételnyi szünetet tartani, és egy pillantást vetni arra, milyen messze is vannak a mindennapi tapasztalataink a kvantummechanika világától. A 10^{-27} az egymilliárdod milliárdod milliárdod részt jelenti. Ha egy test átmérője 10^{-27} cm, akkor egyetlen centiméteren egymilliárdszor milliárdszor milliárd darab férne el belőle. De vajon milyen méretek tartományába jutnánk, ha egymás mellé helyeznénk egymilliárdszor milliárdszor milliárd darab 1 cm-es tárgyat - mondjuk kockacukrot. A válasz egyszerű, a sor hossza 10^{27} cm lenne. Mekkora ez a távolság? Nos, a csillagászatban a távolság általánosan használt

6 Lásd *Blinded by the Light* című könyvemben.

mértékegysége a fényév, vagyis az a távolság, amelyet a fénysugár egy év alatt megtesz. Egy fényév kb. 10^{18} cm-rel egyenlő, vagyis a 10^{27} darab, egymás mellé helyezett kockacukor egymilliárd (10^9) fényév távolságig érne el. A Világegyetemben megfigyelhető legtávolabbi égitestek, egyes kvazárok távolsága tízmilliárd fényév. Eszerint tehát a 10^{27} kockacukor a legtávolabbi égitestek távolságának tizedéig elérne. Hozzávetőlegesen azt mondhatjuk, hogy a kvantummechanika törvényei a kockacukornál annyszor kisebb méretek világában kezdenek működni, ahányszor a kockacukor kisebb a belátható Világegyetem méreténél. Más összehasonlításra ad alkalmat, ha megjegyezzük, hogy az ember mérete - logaritmikus skálán - feleúton fekszik a kvantumok birodalma és az egész Világegyetem között. Meggyőződésünk szerint mindkét véglet megismerésére képesek vagyunk. Nem számítunk arra, hogy a hullám-részecske kettősség egy téglá, egy ház vagy egy ember esetében megmutatkozzék, mert ezek a dolgok rendkívül nagyok a Planck-állandóhoz képest. Ezzel szemben a fizikusok most már úgy gondolják, hogy a hullám-részecske dualitás a kvantummechanika objektumai körében közvetlenül is meg fog nyilvánulni, jóllehet a koppenhágai értelmezés egyik kulcsfontosságú tétele értelmében nincs lehetőség a két tulajdonság egyidejű megfigyelésére. Bohr elég egyértelműen fogalmazott ezzel kapcsolatban, amikor azt állította, hogy elvileg lehetetlen egy objektumot, például fotont vagy elektront egyidejűleg hullámszerűnek és részecskeszerűnek látni. Bohr és a koppenhágai értelmezés szerencsétlenségére a kísérleti fizikusok mostanában éppen ezt az állítást igyekeznek megkérdőjelezni, amint a későbbiekben látni fogjuk.

A lényeg az, hogy a koppenhágai értelmezés működik - beleértve a határozatlansági relációt, a hullámfüggvény összeomlását, a valószínűségeket, az észlelő szerepét és a kísérletek holizmusát -, legalábbis abban az értelemben, hogy eljárások sokaságát kínálja, amelyek segítségével a fizikusok megjósolhatják kísérleteik végkimenetelét. Nem magyaráz azonban meg mindent. Ez a felismerés nem új keletű. Einstein élete tíz évét szentelte a Bohrral levélben folytatott barátságos hadakozásnak, melynek során rá akart mutatni a koppenhágai értelmezés hibáira és képtelenségére. Eközben Schrödinger kidolgozta a kvantummechanika abszurditásának legismertebb illusztrációját, amellyel megpróbálta meggyőzni kollégáit, hogy az elgondolások egész csokra egyszerűen nevetséges, ezért legcélszerűbb lenne mindenestül elvetni. Természetesen a dobozba zárt macskáról szóló híres „gondolatkísérletre” utalok, amely közismert ugyan (a macska 1995-ben már 60 éves volt), mégis érdemes összefoglalni, mint azoknak a nehézségeknek az iskolapéldáját, amelyeket a kvantummechanika bármely, tökéletesített értelmezésének - amely ténylegesen magyarázatot ad a dolgokra - meg kell tudnia magyarázni.

Macska a dobozban

A dobozba zárt macskával végzett „kísérletből” tűnik ki legvilágosabban a koppenhágai értelmezés egyik legkülönösebb tulajdonsága, nevezetesen a tudatos megfigyelő szerepe, amikor meg szeretné állapítani, mi történik a mikrovilágban. A legegyszerűbb esetben képzeljünk el egy dobozt, amelyben

semmi más nincs, csak egyetlen elektron. Ha senki rá sem néz a dobozra, akkor a koppenhágai értelmezés szerint az elektron azonos valószínűséggel található meg a doboz belsejének bármely pontjában - az elektronhoz tartozó valószínűségi hullám egyenletesen tölti ki a doboz belsejét. Ezután képzeljük el, hogy anélkül, hogy bárki bekukkantana, automatikusan egy elválasztófal tolódik be a doboz közepére, ezzel a dobozt két egyenlő félre osztva. A józan ész azt diktálja, hogy az elektron vagy a doboz egyik felében van, vagy a másikban. A koppenhágai értelmezés szerint viszont a valószínűségi hullám továbbra is egyenletesen oszlik el a két fél doboz között. Ez azt jelenti, hogy az elektron továbbra is 50-50% eséllyel található meg a doboz egyik vagy másik felében. A hullámfüggvény csak akkor omlik össze, vagyis az elektron csak akkor válik valóságossá, amikor valaki belenéz a dobozba, és feljegyzí, melyik felében található az elektron. Abban a pillanatban az elválasztófal túlsó oldalán eltűnik a valószínűségi hullám. Ha ezután visszazárjuk a dobozt, és nem figyeljük tovább az elektront, akkor a valószínűségi hullám ismét szétterjed, és kitölti a doboznak azt a felét, amelyikben megtaláltuk az elektront, azonban nem terjed át a doboz másik felére.⁷

A fizikus Paul Davies tömören így foglalta össze a helyzetet: „Olyan ez, mintha a megfigyelés előtt egy-egy ködszerű, „kísértet”-elektron töltené be a két helyiséget. Arra a megfigyelésre várnak, amely az egyiküket „valóságos” elektronná változtatja, míg ezzel egyidejűleg a másikat nyomtalanul eltünteti.”⁸ Ebben az esetben az „egyidejűleg” szó ugyancsak fontos, mert rámutat, hogy a helyhez nem kötöttség újabb példájával állunk szemben. Mielőtt azonban rátérnék ennek a következményeire, szeretném bemutatni Schrödinger arra vonatkozó magyarázatát, milyen képtelen az az állítás, amely szerint a megfigyelő felelős a doboz egyik vagy másik felében található elektron valóságos voltáért.

Schrödinger fejtörője 1935-ben jelent meg először nyomtatásban. A gondolat kísérletben olyan kvantummechanikai helyzetet állít elő, amelyben az eseményeknek csak két lehetséges kimenetele van, és ezek mindegyikének pontosan 50 százalék a valószínűsége. Eredeti példájában a radioaktív bomlást használta, mert ez a fizikai folyamat valószínűségi szabályoknak engedelmeskedik, ám a szituációt könnyűszerrel átalakíthatjuk a kettéosztott dobozban elhelyezkedő elektron példájára. Schrödinger eredeti leírása szerint a kísérletet egy acélkamrában végezzük el, ez került be a kvantummechanikai folklórba a többek között a szóban forgó macskát is tartalmazó „dobozként”. A magam részéről szívesebben használom a „kamra” szót, mert ez tágabb teret enged a macskának az élet élvezetére, legalábbis amíg erre lehetősége van. Ezek a körülmények azonban egyáltalán nem befolyásolják Schrödinger érvelésének igazságát.

Képzeljük el tehát az általam már leírt teljes rendszert - a kétrészes dobozt, az

⁷ Legalábbis nem azonos valószínűséggel. Valamekkora (de nagyon kicsiny) valószínűséggel az is előfordulhat, hogy az elektron a doboz másik felében, vagy teljesen a dobozon kívül fog elhelyezkedni, azonban példánk szempontjából ez a két lehetőség nyugodtan figyelmen kívül hagyható.

⁸ Davies és Brown: The Ghost in the Atom, 22. oldal.

egyetlen elektront és az automatikusan becsúszó elválasztó falat. Mindez egy ablaktalan, zárt szobában lévő asztalon helyezkedik el. Az elválasztófal már betolódott, így két részre választotta a dobozt, amelynek mindkét felében pontosan 50 százalékos valószínűséggel található meg az elektron. A dobozon kívül egy elektrondetektor található; ez egy olyan szerkezettel áll összeköttetésben, amelyik mérgező gázzal árasztja el a helyiséget, amikor felfog egy elektront. A szoba sarkában nyugodtan ül a macska, aki csak a maga dolgával törődik. Schrödinger „sátáni szerkezetnek”⁹ nevezte a berendezést, ám ne feledjük, hogy csupán „gondolatkísérletről” van szó, így a valóságban egyetlen valóságos macskának sem kellett elszenvednie azokat a borzalmakat, amelyekről rövidesen szó lesz.

Schrödinger lényegében arra kér bennünket, képzeljük el, mi történik, ha az elektront tartalmazó doboz egyik fele automatikusan kinyílik, lehetővé téve, hogy az elektron - ha a doboznak abban a felében tartózkodott - kiszökjék a dobozból. Megfigyelő nem tartózkodik a szobában, így senki sem tudja, mi történik a lezárt helyiségben. A koppenhágai értelmezés szerint az elektron továbbra is 50 százalék valószínűséggel tartózkodik a dobozban, ám most már annak is 50 százalék a valószínűsége, hogy kijutott a dobozból a szobába. Minthogy csak gondolatkísérletről van szó, nyugodtan feltételezhetjük, hogy a szobában elhelyezett detektorunk rendkívül érzékeny, egyetlen, a szobában a már ott lévő dolgok mellett újonnan megjelenő elektron kimutatására is teljes biztonsággal alkalmas. Ha tehát az elektron kiszabadult a dobozból, azt a szerkezetnek érzékelnie kell, így ennek megfelelően megindul a mérgező gáz kiszabadulása, és a macska elpusztul.

Azt gondolhatnánk, hogy mindez akkor is megtörténik, ha nincs szemtanúja az eseményeknek: az elektron vagy megszökik a dobozból, vagy nem. Ha nem, akkor a macska biztonságban van; ha igen, akkor az elektron hullámfüggvénye összeomlik, mihelyt a detektor érzékeli a jelenlétét, a macska pedig kimúlik. Bohr álláspontja szerint azonban ez a hétköznapi gondolkodásmódon alapuló vélekedés hibás.

A kvantummechanika standard értelmezése szerint, minthogy maga az elektrondetektor is a kvantumvilág mikroszkopikus részecskéiből (atomokból, molekulákból és így tovább) épül fel, és az elektronnal történő kölcsönhatás ezen a szinten megy végbe, ezért a detektor is a kvantummechanika törvényeinek engedelmeskedik, tehát rá is igaz a valószínűségi szabály. E kép értelmében az egész rendszer hullámfüggvénye csak akkor omlik össze, amikor egy tudatos megfigyelő (lehetőség szerint gázálarcban, ha továbbra is tudatos akar maradni) kinyitja az ajtót és benéz a szobába. Ebben a pillanatban, és csakis ekkor, nem korábban, az elektron „eldönti”, hogy a dobozon belül vagy azon kívül tartózkodik-e, a detektor „eldönti”, érzékelt-e az elektront, vagy nem, a macska pedig „eldönti”, hogy él-e még, vagy már elpusztult. Mielőtt bárki is benézne a szobába, a koppenhágai értelmezés szerint a szobában az „állapotok szuperpozíciója” uralkodik, ami Schrödinger megfogalmazása szerint „egyenlő mértékben

9 Lásd Wheeler és Zurek: Quantum Theory and Measurement, 157. oldal.

összekeverve tartalmazza (bocsánat a kifejezésért) az élő és a döglött macskát.”¹⁰

Attól függően, hogy mit szeretnénk látni, el tudjuk képzelni, hogy a szobában egy egyszerre élő és holt macska tartózkodik, vagy hogy a macska sem nem él, sem el nem pusztult, hanem valamiféle átmeneti állapotban leledzik. Amennyiben azonban a koppenhágai értelmezés helyes, akkor egyvalamit nem képzelhetünk el, nevezetesen azt, hogy a szobában - mielőtt oda valaki benézne - vagy egy közönséges élő, vagy egy már elpusztult macska található.

Az egész érvelés lényege a koppenhágai értelmezés képtelenségének a kimutatása, ne csodálkozzunk tehát, ha gyenge pontokat találunk az okfejtésben. A legnyilvánvalóbb probléma a „tudatos” megfigyelő definiálása. A macska szakértelme nyilvánvalóan elegendő annak megállapításához, hogy belélegezte-e a mérget, és ettől elpusztult-e. Vajon a macska reagálása az eseményekre nem játszhatja ugyanazt a szerepet, mint amit az ajtón bepillantó ember? Akkor viszont hol húzzuk meg a határvonalat? Természetesen valahol útközben az embertől a kvantumvilág felé vezető úton. Akkor tehát talán egy hangya is képes kiváltani a hullámfüggvény összeomlását? Vagy netalán egy baktérium?

Vizsgáljuk meg a problémát most a másik irányból; induljunk ki a kvantumvilágból, és haladjunk a nagyobb méretek felé. Nagyon jól hangzó érv, hogy az elektrondetektor azért nem idézheti elő a hullámfüggvény összeomlását, mert maga is kvantummechanikai objektumokból áll, és pedig atomokból, molekulákból - ám az emberi lények (akárcsak a macskák) ugyancsak atomokból és molekulákból épülnek fel. Ha a detektor nem alkalmas a hullámfüggvény összeomlásának kiváltására, akkor mi magunk miért tudjuk ezt megtenni? És vajon az élet ebben az értelemben szükséges feltétele a megfigyelő tudatosságának? Az is elegendő lenne a hullámfüggvény összeomlásához, ha egy elegendően bonyolult számítógép nézne be a szobába?

Távolodjunk el még messzebbre az eredeti elektrontól! Mi a helyzet akkor, ha a szobába bepillantó ember, aki ellenőrizni akarja, él-e még a macska, egyedül van az egész, éjszakára bezárt épületben? A szigorúan vett koppenhágai értelmezés szerint az állapotok szuperpozíciója (a Schrödinger-féle összemaszatolódás) erre a megfigyelőre is kiterjed mindaddig, amíg valaki más az épületen kívülről be nem néz, hogy a kísérlet állását ellenőrizze (vagy esetleg telefonon érdeklődik az események alakulásáról). Nemcsak a macska, hanem a megfigyelő ember is átmeneti állapotban marad mindaddig, amíg valaki rá nem néz. De vajon ki figyeli meg az épületen kívül tartózkodó megfigyelőt, hogy az ő hullámfüggvénye is összeomoljék? Nem kellene a végtelenségig tartania a folyamatnak?

A kritikus kérdés az, hol húzzuk meg a határvonalat a kvantummechanikai valószínűségek és az általunk valóságnak vélt állapot között. Hány molekulából kellene állnia egy rendszernek ahhoz, hogy „valóságossá” váljék és képes legyen előidézni a hullámfüggvény összeomlását. És miként kell ezeknek a molekuláknak a rendszeren belül elrendeződniük ahhoz, hogy megvalósulhasson a trükk?

Ez az a feladvány tehát, amely mostanában próbára teszi a filozófusokat éppúgy, mint a „kvantummechanikusokat”. Mindannyian tudják, hogy a kvantummechanika működik, ám tudni szeretnék, miért működik. Emellett szeretnének valamilyen megérthető képet kapni arról, mi történik a lezárt szoba belsejében, amikor senki sem néz oda. A kvantummechanika azonban sokkal több rejtélyt tartalmaz, mint amit a „macska a dobozban” esete felvet. Mielőtt áttérnék a kvantummechanika jelentésének tárgyalására, szeretnék alaposabban rávilágítani a rejtély mélyebb összefüggéseire. Ehhez segítségül hívom Schrödinger macskájának kiscicáit.

A valóság másik arca

A fizikában végbement drámai fejlődést jól jelzi, hogy bár még soha senki sem próbált meg a valóságban egy macskát a gondolatkísérletben leírt módon dobozba zárni, mert meg akarta volna vizsgálni, mi történik vele, azonban egy másik gondolatkísérlet, amelyet Albert Einstein nem sokkal Schrödinger dobozba zárt macskája előtt gondolt ki, az 1980-as években valóra vált. Talán jobb is, hogy Einstein nem érte meg, mire gondolatkísérlete valósággá vált, mert bár a kísérletet a dobozba zárt macska feladványához hasonlóan ő is a kvantummechanika abszurdításának bizonyítására ötlötte ki, amikor a kísérletet ténylegesen elvégezték, az eredmény egyértelműen a kvantummechanika diadalmas dicsőségét hirdette.

Einstein nem egymaga dolgozta ki ezt a sajátságos ötletet. Az 1930-as évek elején, nem sokkal Princetonba költözése után Boris Podolsky és Nathan Rosen voltak a segítségére. A feladvány hármójuk neve alatt 1935-ben jelent meg nyomtatásban - vagyis pontosan ugyanabban az évben, amikor Schrödinger megjelentette a dobozba zárt macska J „paradoxonát”. Einsteinek „EPR-paradoxonként” ismertté vált gondolatkísérlete rávilágít, mennyire nem logikus a kvantumvalóság (legalábbis hétköznapi, józan eszünk mércéjével mérve).

A rejtélyt Dávid Bohm Angliában letelepedett amerikai fizikus 1951-ben fejlesztette tovább, ám az abban az időben is csak gondolatkísérlet maradt. Az 1960-as évek közepén azonban John Bell, a genfi CERN-ben dolgozó ír fizikus megtalálta a módját, miként lehetne a feladványt kísérleti formába önteni, amely kísérletben egy atom egyidejűleg két ellentétes irányban egy-egy fotont bocsátott ki. Abban az időben azonban még maga Bell sem gondolta, hogy a kísérletet tényleg el is lehet végezni. A rá következő mintegy 20 év alatt azonban nagyon sok kutató megpróbálkozott a Bell által leírt kapcsolat kísérleti ellenőrzésével. A legteljesebb és legjelentősebb következményekkel járó kísérletsorozat Alain Aspect és munkatársai nevéhez fűződik, aki az 1980-as évek elején Párizsban az Orsayn dolgozott. A kutatócsoport minden kétséget kizáróan bebizonyította, hogy a józan ész (és Einstein) téved, és a kvantumvilágban valóban a helyhez nem kötöttség uralkodik. A következőkben az EPR-paradoxon Bell által kísérleti formába öntött, majd Aspect által ellenőrzött változatát ismertetem.

Az Aspect-kísérletben a fotonok polarizációnak nevezett tulajdonságát mérték. A polarizációt például úgy képzelhetjük el, hogy a polarizált fény minden egyes fotonja egy meghatározott irányba mutató nyilat visz magával - felfelé, lefelé, oldalt vagy valamilyen köztes irányba mutathatnak a nyilacsák. A polarizált fény számos furcsa tulajdonságát ismerjük, amelyek némelyikét a harmadik fejezetben részletesen fogom tárgyalni, egyelőre azonban csak annyi az érdekes, hogy a foton polarizációjának különböző tulajdonságait meg lehet mérni, és ezek a tulajdonságok a kvantummechanika szabályainak megfelelő összefüggésben állnak egymással. A valóságos helyzetet némileg leegyszerűsítve azt mondhatjuk, hogy az egyik fotonnak felfelé, a másiknak oldalirányban kell mutatnia, de nincs olyan szabály, amelyik előírná, hogy melyik merre mutasson. Amikor egy atom egyszerre két fotont bocsát ki, azok Schrödinger macskájához hasonlóan mindaddig az állapotok szuperpozíciójában léteznek, amíg valaki meg nem méri egyikük polarizációját. A mérés pillanatában a megmért polarizációjú foton hullámfüggvénye összeomlik a lehetséges állapotok egyikébe - mondjuk a fölfelé mutató állapotba. Ugyanabban a pillanatban a másik foton hullámfüggvényének is össze kell omlania, méghozzá a másik állapotba - ebben az esetben az oldalra mutatóba. Senki sem nézte meg a másik fotont, sőt a mérés pillanatában bizonyára nagyon messze vannak egymástól (elvben akár a Világegyetem átellenes részein is lehetnek); mégis, a két foton hullámfüggvényének egyszerre kell össze-omlania. Ez az, amire Einstein a „kísérteties távolhatásként” hivatkozott. Olyan ez, mintha a két kvantummechanikai objektum (ebben az esetben a két foton) örökre kapcsolatban maradna egymással, ezért amikor az egyiket megütjük, akkor a másik rándul össze, függetlenül attól, milyen messze vannak éppen egymástól.

Mindez felettébb iszonytató lehetett Einstein számára, mert amint látni fogjuk, a relativitáselmélete a fénysebesség állandóságán alapul. A fény mindig pontosan ugyanakkora sebességgel terjed, és semmilyen, a fénynél lassabban mozgó test nem gyorsítható fel a fénysebességre. A relativitáselmélet szerint, legalábbis annak eredeti értelmezése szerint, semmilyen hatás sem teremthet kapcsolatot pillanatszerűen két, a térben egymástól távoli részecske között. Amint később látni fogjuk, a relativitáselmélet még annál is többet jelent ki, mint amit Einstein felismert; mindamellettt abban az időben, különösen az ő számára, az elmélet hatásos érvet jelentett az efféle távolhatás létezése ellen.

De vajon hogyan lehet kísérleti úton ténylegesen bebizonyítani (vagy megcáfolni) a távolhatás létezését? Semmi értelme mindkét fotonon végrehajtani a mérést, úgyis mindig a helyes választ fogjuk kapni (például az egyik felfelé, a másik oldalirányban mutat), ám soha nem fogjuk „látni” a két foton közötti, pillanatszerű kapcsolatot. Mindössze csak annyit állíthatunk a mérések elvégzése alapján, hogy minden egyes foton tulajdonságait meg tudjuk határozni abban a pillanatban, amikor elhagyják az atomot, amint azt a józan ész is diktálja. Ha a távolhatást - azaz a helyhez nem kötöttséget - működés közben akarjuk nyakon csípni, akkor egy trükköt kell alkalmaznunk. Három, egymással összekapcsolt méréssel kell dolgozni (az Aspect-kísérletben három polarizációs szög), de valójában csak kettőt kell közülük megmérni, fotononként egyet.

Minthogy a polarizáció elég megfoghatatlan tulajdonság, talán segít, ha megpróbáljuk a színek segítségével is elmagyarázni, mi történik az Aspect-kísérletben (persze ne feledkezzünk meg arról, hogy Aspect csoportja nem a hétköznapi értelemben vett színeket határozta meg). Tételezzük fel, hogy az atom nem egy fotonpárt bocsát ki, hanem két színes részecskét, mondjuk két, parányi biliárdgolyót. Az egyes golyók mondjuk pirosak, sárgák vagy kékek lehetnek, de minden párban a két golyónak különböző színűnek kell lennie.

Ha mindezt le akarjuk fordítani a kvantummechanika nyelvére, akkor azt kell mondanunk, hogy amikor az atom ellentétes irányban kidobja magából a két golyót, akkor a koppenhágai értelmezés szerint egyiknek sincs meghatározott színe. Mindegyik az állapotok a három szín bármelyikét megengedő szuperpozíciójában létezik. Amikor a kísérletező „ránéz” az egyik golyóra, annak hullámfüggvénye összeomlik, és ettől a golyó az egyik lehetséges színt ölti magára. Ugyanebben a pillanatban a másik golyó hullámfüggvénye is összeomlik, és az a két megmaradó szín egyikét veszi fel - ám az elvégzett egyetlen mérésünk alapján nem tudhatjuk, melyiket.

Nos, az egyik golyón például el lehet végezni egy olyan mérést, amely megmondja, hogy az a golyó kék vagy nem kék. A kapott válasz információt nyújt a másik golyó színére vonatkozóan is, bár nem tudjuk meg egyértelműen, milyen állapotot vett fel a másik golyó a saját hullámfüggvénye összeomlása után. Tételezzük fel, hogy az elvégzett mérésünk eredménye „kék”. Ebben az esetben a másik golyó állapota „piros” vagy „sárga” lehet. Az általunk elvégzett mérés másik lehetséges eredménye a „nem kék”. Ebben az esetben nem tudtuk megállapítani, hogy az általunk vizsgált golyó ténylegesen milyen színű, piros vagy sárga, ezért a másik golyó a három lehetséges szín mindegyikét hordozhatja, az alábbi okoskodásból azonban kiderül, hogy nagyobb valószínűséggel kék, mint piros vagy sárga.

Ha az első golyó „kék”, akkor a másik „piros” vagy „sárga”, vagyis 50-50% annak a valószínűsége, hogy e két „állapot” valamelyikében találjuk. Ha viszont az első golyó „nem kék”, akkor két eset lehetséges. Lehet, hogy „piros”. Ha így van, akkor a másik golyó „kék” vagy „sárga”. Az első golyó másik lehetséges állapota a „sárga”. Ebben az esetben a második golyó „kék” vagy „piros” lehet. Eszerint tehát a második golyó állapotára négy lehetőség adódik. A négy lehetőség közül kettő „kék”, vagyis 50% (kettő a négy közül) annak a valószínűsége, hogy a második golyó kék. A négy lehetőség közül egy „piros” és egy „sárga”, vagyis e két szín mindegyikének 25% (egy a négy közül) a valószínűsége. Természetesen a három szín bármelyike előfordulhat, ha egyszer már ránéztünk a golyóra. És az is magától értetődő, hogy a valószínűségek összege éppen 100 százalék.

Az első golyó állapota megmérésének folyamata hatással van arra, milyen valószínűséggel kapunk eredményül egy bizonyos színt a második golyó állapotának meghatározásakor. Ha tudni szeretnénk, milyen mértékben változnak meg az esélyek az első golyón végrehajtott mérés eredményeképpen, nagyon sok golyón nagyon sokszor meg kell ismételnünk a mérést, hasonlóan ahhoz, ahogyan a pénzfeldobásnál is csak kellően nagyszámú kísérlet alapján állapítható meg

egyértelműen a fejek és az írások 50-50%-os gyakorisága. A kritikus tényezőt azon-an Bélinek az a megállapítása jelenti, miszerint a helyhez nem kötöttség működése esetén a statisztikai minta eltér attól, amit akkor kapnánk, ha a golyó abban a pillanatban „választaná meg” saját színét, amikor elhagyja az atomot, és ezt követően nem változtatná meg a színét.

Ezen terminológia szerint a kísérletben a két fotonra együttesen vonatkozó kérdéseket teszünk fel, valahogy ilyen formában: „Igaz-e, hogy az egyik foton kék, vagy nem, és igaz-e, hogy a másik foton sárga, vagy nem?” De feltehetünk egy másik kérdést is: „Igaz-e, hogy az egyik foton kék, vagy nem, és igaz-e, hogy a másik foton piros, vagy nem?” Ha sokszor és sok részecskepáron végrehajtjuk a kérdés megválaszolásához szükséges mérést, akkor összeszámolhatjuk a különféle válaszok gyakoriságát, tehát megmondhatjuk, hányszor fordultak elő „az egyik kék és a másik nem piros”, a „nem kék és nem sárga”, a „kék és nem sárga” és az egyéb lehetséges kombinációk. Bell azt mutatta ki, hogy ha nagyon sok fotonpár vizsgálata során nagyon sokszor feltesszük az efféle kérdéseket, akkor a válaszokban kialakul egy statisztikus minta. Meg tudjuk például határozni, mennyivel gyakrabban kapjuk a „kék és nem sárga” kombinációt, mint a „nem kék és nem piros” választ vagy az egyéb lehetséges kombinációkat. Hangsúlyozni szeretném, hogy a kvantummechanikai objektumok csak akkor dönten el milyen színűek valójában, amikor megfigyeljük őket, miközben a józan ész azt diktálná, hogy abban a pillanatban, amikor elhagyja az atomot, már meghatározott színe van a részecskének, és ezt a színt mindvégig meg is tartják. Ez a viselkedésselbeli különbség eltérést okoz a kvantumvilág és a józan ész törvényeinek engedelmeskedő világ esetében kapott statisztikus minták között.

Bell kimutatta, hogy ha a józan észnek engedelmeskednek a fotonok, akkor a mérések egy meghatározott eredményének - vagyis a részecskék egyik viselkedési mintája, amelyet A mintázatnak nevezhetünk - gyakrabban kell előfordulnia, mint a mérési eredmények egy másik kombinációjának - nevezzük ezt a másik viselkedési mintát B mintázatnak. Hétköznapi gondolkodásunk szerint tehát az A mintázat gyakoribb a B-nél. Az Aspect-kísérlet (és sok más, hasonló gondolatmenetet követő kísérlet) kimutatta, hogy ez az aszimmetria sérül. Az A mintázat előfordulásának gyakorisága mérhetően kisebb volt a B mintázat előfordulási gyakoriságánál.

Bár a matematika nyelvén fejeztük ki, az érvelés a hétköznapi gondolkodás logikáján alapul. Így például a köznapi logikánk szerint a világon a tinédzserek számának kisebbnek kell lenni, mint a tini lányok és a minden korosztályhoz tartozó férfiak együttes száma. Az Aspect-kísérlet eredménye hasonlatunkban annak felelne meg, mintha kiderülne, hogy valójában több tinédzser él a Földön, mint ahány tini lány és minden korosztályhoz tartozó férfi (tinédzserek és felnőttek) együttesen. A Bell-féle egyenlőtlenség megsérül, ami azt jelenti, hogy a helyhez nem kötöttség működik, tehát a kvantumelmélet igazsága bebizonyosodott - bár egyelőre még nem tudjuk, mit jelent mindez.

Maga Bell a kvantumelméletet „csak átmeneti, kiegészítő eszköznek”¹¹ tekintette, és mindig abban reménykedett, hogy a fizikusok képesek lesznek előállni egy újabb elmélettel, amely meg tudja magyarázni ezeket a furcsaságokat egy valóságos világ fogalmaival, amely világ akkor is létezik, ha nem hajtunk végre rajta méréseket, vagy nem nézünk oda. Bár az Aspect-kísérlet eredménye ebben az értelemben merőben ellentétes volt azzal, amiben Bell reménykedett (bár nem ellentéte annak, amire az elmélet korábbi sikerei alapján reálisan számított), később elmondta a fizikus Nick Herbertnek, hogy „örül, mert így legalább valami egyértelműen és világosan kiderült ebben a ködös és zavaros világban”, jóllehet az eredmények éppen ellentétesek voltak a józan ész várakozásával és saját előítéleteivel.¹²

Az Aspect-kísérlet következményét kicsit egyszerűbben megfogalmazva, egyszerűbb példával élve azt mondhatjuk, hogy ha az atom két részecskét különböző irányokba bocsát ki, akkor a kvantummechanika szabályai szerint az egyiknek pirosnak, a másiknak sárgának kell lennie, ám a szabályok nem rendelkeznek arról, melyik golyó milyen színű. Sőt a részecskék mindegyikében mindaddig az állapotok szuperpozíciója áll fenn, amíg egy tudatos megfigyelő meg nem állapítja egyikük színét. Abban a pillanatban a megfigyelt részecske hullámfüggvénye az egyik irányban (a két lehetséges szín egyike felé) omlik össze, és ugyanabban a pillanatban a másik részecske hullámfüggvénye a másik színné omlik össze. E helyütt ismételten érdemes hangsúlyozni, hogy ez nem egy valóságtól elrugaszkodott elméleti fizikus örült elme-szüleménye, de nem is egy csupán elméletben részletesen kimunkált gondolatkísérlet. Ennek a helyhez nem kötött viselkedésnek a létezését egy valóságos, fotonokkal végzett kísérlettel sikerült bebizonyítani. A kísérletet kicsit át is alakíthatjuk, egy elektron és két kiscica közreműködésével, így Schrödinger híres gondolatkísérletének olyan, korszerűsített változatát kapjuk, amelyik figyelembe veszi Aspect kísérletének eredményét, a Bell-egyenlőtlenség sérülését. Így egyszer és mindenkorra szemügyre vehetjük, mi következik a helyhez nem kötöttségből és a távolhatásból.

Schrödinger macskájának kölykei

Most jön, ami még nem volt! Íme, az alapvető probléma, a maga teljes pompájában.

Képzeljünk el két kiscicát, Schrödinger macskájának ikerkölykeit. Mindkettőt bezárjuk egy megfelelő berendezéssel felszerelt, és elegendő élelemmel felpakolt úrhajóba. A két úrhajót vékony cső köti össze egymással, amely a két végén az úrhajók felé nyitott. A cső közepén egy doboz helyezkedik el, annak a közepén az automatikusan becsúszó válaszfallal. A dobozban - talán cseppet sem meglepő - egyetlen elektron helyezkedik el. Mindkét úrhajót felszereltük a szokásos ördögi szerkezettel, amely elpusztítja az abban az úrhajóban utazó macskát, ha az összekötőcsőből az elektron megérkezik az úrhajóba. Természetesen a cső

11 Davies és Brown: The Ghost in the Atom, 51. oldal.

12 Herbertnek írott levél, idézi Herbert: Quantum Reality, 212. oldal.

közepén az elektront tartalmazó doboz teljesen elzárja a csövet, így semmi sem juthat át az egyik űrhajóból a másikba. A dobozt a két oldalán viszont ugyancsak elcsúsztatható falak zárják le.

BEVEZETÉS: A PROBLÉMA • 51

Emlékezzünk csak vissza, amíg senki sem néz oda, addig az elektron valószínűségi hulláma egyenletesen tölti ki a dobozt. Amikor a dobozt a közepére becsúszó válaszfal két részre osztja, az elektron 50 százalékvalószínűséggel található a doboz egyik felében, és ugyancsak pontosan 50 százalék a valószínűsége annak, hogy a részecske az elválasztófal másik oldalán tartózkodik. Amikor tehát a doboz két oldalfala kinyílik, a valószínűségi hullám mindkét űrhajóban egyenletesen szét fog terjedni. Ha ezután az összekötőcsövet a dobozt kettéosztó falnál automatikusan elvágjuk, akkor két, egymástól független, összeköttetésben nem álló űrhajónk lesz. Mindkét űrhajóban ott lapul egy macska, kiszolgáltatva a gyilkos szerkezetnek, amely automatikusan elpusztítja őt, ha érzékeli az elektron jelenlétét. Ugyanakkor mindkét űrhajóban jelen van az elektron valószínűségi hullámának 50 százaléka. Az elektronszármazék, az ördögi szerkezet és a macska egyaránt az állapotok szuperpozíciójában létezik.

Minthogy csak gondolat kísérletről van szó, hipotetikus űrszondáinkat a fizika törvényei által megengedett lehető legnagyobb hajtóművekkel szerelhetjük fel - bár természetesen nem engedjük meg Einstein relativitáselméletének megsértését, ezért az űrhajók nem haladhatnak a fény sebességénél gyorsabban. Feltételezzük továbbá, hogy a kiscicák szívós és (amennyire ezt az ördögi eszközök lehetővé teszik) hosszú életű alomból származnak. Nos, miután a két űrhajó szétvált, automatikusan beindulnak a hajtóművek, és egymással ellentétes irányban gyorsítják az űrhajókat. Évekig utaznak, míg végül az egyik megérkezik egy távoli bolygóra, amelyet értelmes (tudatos) lények laknak. A másik űrhajót addigra a szuperhatékony hajtóművei már egy fényévnél is messzebbre repítették.

Az intelligens földönkívüliek kíváncsiak arra, mit rejthet a kapszula, ezért felnyitják a fedelét és bekukucskálnak. Abban a pillanatban az űrhajó tartalmának a hullámfüggvénye összeomlik. „Eldönti”, hogy az eredeti elektron az éppen megfigyelt űrhajóba került-e vagy a másikba. Ha ebbe jutott, akkor a macska elpusztul - de pontosabb az a megfogalmazás, miszerint a megfigyelés pillanatában kiderül, hogy az állat már azóta halott volt, amióta az elektron kiszabadult a dobozból. Abban a pillanatban, amikor az idegenek észreveszik a döglött macskát, a másik kiscica kiszabadul az állapotok szuperpozíciójából és végérvényesen „élővé válik”. Természetesen a másik lehetőség értelmében az idegen lények egy élő macskát találnak az űrhajóban. Ebben az esetben viszont ez a megfigyelésük a halálos ítéletet jelenti a másik cica számára. Nem mondhatjuk, hogy mindkét macska élő is volt, meg holt is volt egyszerre, sokkal inkább jellemzi a helyzetet az a megfogalmazás, mely szerint az űrutazás éve alatt egy élő és egy halott macskánk volt, ám teljes bizonytalanságban vagyunk arra vonatkozóan, melyik állat melyik űrhajóban utazott. Tartalmazhat persze a két űrhajó egy-egy kísértetet is, amelyek mindegyike a történelem két különböző

menetét jelenti, amelyek egyike a feledés homályába halványul, a másik pedig valóságossá válik a megfigyelés pillanatában.

Ami a koppenhágai értelmezést illeti, a történetek értelmezése lényegében tetszés szerinti. Ezen a szinten nem létezik „hivatalos értelmezés”, a koppenhágai értelmezés csak annak kijelentésére szorítkozik, hogy ha sok ezerszer elvégezzük ugyanezt a kísérletet a két macskával, akkor az idegen bolygóra érkező űrhajók felében élő, a másik felében azonban döglött macskát fognak találni az ottaniak. A másik macska viszont mindig a bolygóra érkező testvérével ellentétes állapotban lesz. A standard értelmezés még a történeteknek arról a következményéről sem ejt egyetlen szót sem, hogy a gondolkísérletben a hullámfüggvény összeomlásának pillanatában felbukkanó, nem helyhez kötött működés, azaz távolhatás bizonyos szempontból az időutazás egyik elemét is tartalmazza.

Azzal is érvelhetnénk, hogy a megfigyelés művelete nemcsak térbeli jelet indít útjára, hanem az időben visszafelé is jelez valamit, egészen addig a pillanatig, amikor az elektron kiszabadult a dobozból és eldőlt, hogy melyik űrhajóba kerül. Ezt tulajdonképpen semmivel sem nehezebb megemésztetni, mint a jelek pillanatszerű terjedését nagy térbeli távolságokra, hiszen Einstein relativitáselméletének egyik következménye pontosan az, hogy ha valamely jel képes a fénysebességnél gyorsabban haladni, akkor ugyanezen jel az időben visszafelé is haladhat (természetesen ez az egyik ok, amiért a jelek fénysebességnél gyorsabb terjedését lehetetlennek tartjuk).

Furcsának tűnhet, ha elfogadjuk az időben visszafelé haladó jelek lehetőségét, ám mégis érdemes lenne, ha ezt beépíthetnénk a kvantumvilág átfogó, új értelmezésébe, és ennek árán megszabadulhatnánk az állapotok kísérteties szuperpozíciójától, amelynek képtelenségét legszemléletesebben Schrödinger macskájának és kiscicáinak sorsa érzékeltette. Egy ízben maga Bell is kijelentette, hogy ha választania kellene, akkor szívesebben tartaná meg az objektív valóság fogalmát, és vetné el a jelek fénysebességnél gyorsabb terjedésének lehetetlenségét.¹³ Ha azonban meg akarjuk érteni, miért megrázó jelentőségű és (talán) mégis fenntartható a két választási lehetőség mindegyike, akkor többet kell tudnunk a fény természetéről, hiszen a fény viselkedése a relativitáselmélet és a kvantummechanika szempontjából egyaránt kulcsfontosságú.

Ha Ön, kedves olvasó, az a típus, aki a krimiket az utolsó oldalon kezdi olvasni, és ha úgy gondolja, hogy Ön már mindent tud a relativitáselmélet és a kvantummechanika hagyományos értelmezéséről, akkor mindenképpen pillantson bele most az Epilógusba. Ám ha ezt teszi, ígérje meg, hogy visszatér ide, és elolvassa a könyv többi részét is. A jó krimiírókhoz hasonlóan ugyanis én is rejtegetek még a tarsolyomban néhány trükköt, amellyel szívesen elszórakoztatnám Önöket, mielőtt végleg búcsút veszünk egymástól. E trükkök némelyike, akárcsak a jó varázslóké, olyan tükröt tart elénk, amelyben előtűnik magának a fénynek a rejtélyes természete.

13 Davies és Brown: The Ghost in the Atom, 50. oldal.

1. A fény - az ősidőkben

Nézőpont kérdése, hogy a természettudományban mit tekintünk ősidőnek. A Világegyetem és működésének leírása - az elméletek és a matematikai modellek - nem foglalja magában a kvantummechanika gondolatait, ezért erre gyakran „klasszikus” elméletként szoktunk hivatkozni. Ezen ismertetőjel alapján Isaac Newton klasszikus természettudós volt, legalább annyira, mint Arkhimédész. Valójában e definíció szerint Einstein mindkét relativitáselmélete klasszikus elméletnek számít. És mégis, a XX. század fizikája két pillérre épült, a kvantumelméletre és a relativitáselméletre. Mindkettő megváltoztatta a tudósok szemléletmódját, és mindkettő a XX. század elején született. Más szempontból tehát a természettudomány őstörténetébe minden beletartozik, ami körülbelül 1900 előtt történt. Ebben az értelemben használom én is a címben szereplő kifejezést, amikor a fény kutatásának őstörténetét szeretném bemutatni - mindazt, ami az ókori görögöktől James Clerk Maxwell munkásságáig történt, aki a XIX. században bebizonyította, hogy a fény elektromágneses hullám.

Az ókori filozófusok úgy gondolták, hogy a fény a szemből indul ki, mint a fénykéve a világítótoronyból, majd mint a vak ember a botjával, „letapogatja” a világ természetét. A Kr. e. V században élt Empedoklészről származott az a feltevés, miszerint a világon minden a négy „őselemből” (földből, levegőből, tűzből és vízből) épül fel. Empedoklész leírta, miként alkotta meg Aphrodité a szeretet által összetartott négy elemből a szemet. A szem tüzeit a Világegyetem családi tűzhelyénél lobbantotta lánggra, ezért a szem lámpásként működik, amely a szemben rejtőző tüzet kiengedi a világba, lehetővé téve ezáltal a látást.¹⁴

Empedoklész felismerte, hogy ennél több fényre van szükség, és arra is rájött, hogy az éjszaka sötétségét az okozza, hogy a Föld saját teste a Nap fénysugarainak útjába áll. A Kr. e. III. században élt Epikurosz hasonlóképp vélekedett, az ő elképzeléseit Lucretius római író foglalta össze, aki Kr. e. 55-ben A dolgok természetéről (De rerum natura) című művében így írt: „A Nap fénye és hője parányi atomokból áll, amelyek miután kilökődnek, nem vesztegetik az idejüket, hanem azonnal útnak indulnak a levegőben annak a testnek az irányában, amelyik felé kidobódtak.” Mai tudásunk birtokában megállapíthatjuk, hogy ez a kijelentés a kor ismereteihez képest figyelemreméltóan pontos volt, jóllehet nem tükrözi az abban az időben a legtöbb ember által vallott nézetet. Évszázadokon át fennmaradt az az elképzelés, mely szerint a látás folyamata során valami kiáramlik a szemből. Platón, aki Kr. e. 428 és 347 között élt, a belső és a külső fény menyegzőjéről írt. Eukleidész, aki Kr. e. 330 körül született és Kr. e. 260 körül halt meg, egyebek között a látás működésének sebességén töprengett. Rámutatott, hogy ha becsukjuk, majd ismét kinyitjuk a szemünket, akkor a nagyon távoli csillagok is azonnal megjelennek a szemünk előtt, bár a látás hatásának el kellett jutnia a szemünktől a csillagokig és vissza, ahhoz, hogy megpillanthassuk a csillagokat.

14 Lásd Kathleen Freeman: Ancilla.

Ma már ugyan különösnek tûnnek számunkra ezek az ókori elképzelések, mégis úgy látszik, a Krisztus utáni első évezred végéig senki sem vonta kétségbe őket, annak ellenére, hogy Lucretius például érdeklődött Epikurosz munkája iránt. Ennek egyik oka természetesen az európai civilizáció középkori hanyatlása volt a Nyugat-római Birodalom bukását követően. A rómaiakat soha nem érdekelték különösebben a természettudományok, és a kor tudománya soha nem heverte ki az alexandriai nagy könyvtár Július Caesar uralkodása alatt történt leégését - a tűzben a görögök legtöbb természettudományos tanítása füstté vált. Még több könyv pusztult el vagy veszett el a birodalom bukásakor. Az ezt követő ezer év során a kor természettudománya jórészt az ókori tudósok eredményei iránti tiszteletet jelentette, miközben megpróbálták tanításaik fennmaradt darabjaiból minél többet megőrizni. Az első természettudós, aki túllépett az ókori görögök eredményein kutatásban, egy arab tudós volt, aki 965 és 1038 között, az iszlám kultúra virágkorában élt. Az ókori világról és természettudományos világképről meglévő tudásunk legnagyobb részt annak köszönhető, hogy az ókori dokumentumokat görögről és más nyelvekről lefordították arabra, majd később arabról a különböző európai nyelvekre. Az ókori anyagok sok esetben a Kelet-római Birodalmon, azaz Bizáncon keresztüljutottak el az arab világba, a birodalomnak ez a része ugyanis Róma bukását követően még csaknem pontosan ezer évig, 1453-ig fennmaradt. Bizánc és az arab világ kapcsolata legalábbis viharosnak nevezhető, ám a szellemi javak cseréje kétségtelenül megvalósult.

Az ókoriak elképzeléseire támaszkodva és azokat továbbfejlesztve (ne felejtjük el, hogy számírási rendszerünk is arab eredetű) az arab tudósok gazdag örökséget adtak át Nyugat-Európának. Ez fontos szerepet játszott a tudományos kíváncsiság tüzeinek újraélesztésében. Jó példa erre a fény tanulmányozása.

Az első modern természettudós

Abu Ali al-Hassan ibn al-Haytham a középkor legjelentősebb tudósa volt, akinek az eredményeit csak több mint 500 év múltán, Galilei, Kepler és Newton korában sikerült túlszárnyalni. Európában (végül) Alhazen néven vált ismertté. Több tucat könyvet írt (bár ezeket mai fogalmaink szerint inkább csak tudományos cikkeknek nevezhetnénk) a legkülönbözőbb természettudományos és matematikai témákról. Legjelentősebb műve az optikáról írott hét könyve volt, amelyek az ezredforduló környékén születtek. Ezt a munkát a XII. század végén lefordították latinra (a kor szellemi és tudományos életének nyelvére, amit a művelt emberek jóval Newton kora utánig Európa-szerte használtak). Ennek ellenére a könyv Európában (továbbra is latinul) csak 1572-ben jelent meg, *Opticae thesaurus* (Az optika kincsestára) címmel. Akkor széles körben tanulmányozták, ezért jelentős hatást gyakorolt a XVII. század természettudományos forradalmának elindítására.

Alhazen számos logikai érvet sorakoztatott fel állítása alátámasztására, miszerint a látás nem valamiféle, a szemünkből a külvilágba jutó, és azt letapogató, belső fény eredménye, hanem egyszerűen a külvilágból a szembe jutó fény következtében jön létre. Egyik érve a jól ismert utóképfenomenonra támaszkodott. Ha mintegy fél percig mereven nézünk egy erős fényforrást, majd becsukjuk a

szemünket, akkor a fényes tárgy körvonalait csukott szemmel is „látjuk”, bár rendszerint az eredetitől eltérő színben (ezt az eredeti komplementer vagy kiegészítő színének nevezzük).¹⁵ Az ilyen utóképek „a szemünk előtt táncoló foltok formájában” akkor is fennmaradhatnak, ha ismét kinyitjuk a szemünket. Alhazen érvelése szerint ez a jelenség csak úgy magyarázható, ha valamilyen külső hatás éri a szemünket, és ez a hatás olyan erős, hogy akkor is fennmarad, ha lehunyjuk a szemünket, ilyenkor a fény sem be, sem ki nem juthat a szemünkből.

Alhazen további példákat is fel tudott sorakoztatni annak igazolására, hogy a fény hatása kívülről jut be a szembe. A fény viselkedésének megértésére a legnagyobb hatást mégis az úgynevezett „camera obscurában” kialakuló képről írott értekezése gyakorolta; a kifejezés szó szerint „sötét szobát” jelent. A jelenséget már az ókorban is jól ismerték, azonban a legkorábbi leírása Alhazen munkájában található meg. A jelenséget mi magunk is megfigyelhetjük, ha napsütéses időben egy teljesen lesötétített szobában állunk, ahol még az ablakot is sötét függönnyel takarjuk el. Vágjunk apró lyukat a sötétítőfüggönybe - akkorát, mint a golyóstoll hegyén a golyó -, és csak azon keresztül engedjük a fényt a szobába. A lefüggönyözött ablakkal szemközti falon előtűnik a külvilág eredeti színeiben pompázó, odavetített, bár a feje tetején álló képe.

A hatás lenyűgöző és egyben szórakoztató, olyannyira, hogy még napjainkban, a televízió korában is egyes városokban (például a skóciai Edinburgh-ban) a camera obscura modern változatát turistalátványossággént működtetik. Ugyanezen az elven működik a „lyukkamera”, ahol a sötét „szoba” mondjuk egy cipős-, vagy valamilyen más, hasonló méretű doboz lehet. A doboz egyik oldalába tűszúrásnyi lyukat kell fúrni, az ezzel ellentétes oldalt pedig cseréljük pauszpapírra, ez lesz a képernyő. Ha a fejünk és a doboz pauszpapírral fedett része árnyékban van (esetleg a kabátunkat a fejünkre húzhatjuk), a doboz lyukas végét viszont akadálytalanul éri a fény, akkor a környező világ feje tetején álló képe meg fog jelenni az aprócska képernyőn. Végső soron a camera obscura vezetett el a fényképezőgép feltalálásához (sőt a fotokamera elnevezés is innen származik). De vajon hogyan működik?

A camera obscura működésének kulcsa, amint azt Alhazen helyesen felismerte, az a tény, hogy a fény egyenes vonalban terjed. Képzeljük el, hogy tőlünk messze egy fa áll a kertben, arrafelé, amerre a camera obscura néz. A fa tetejéről kiinduló fénysugár keresztülmegy a sötétítőfüggönybe vágott lyukon, és valahol a padló közelében éri el a szemközti falat. Ezzel szemben a fa törzséről induló fénysugár a lyukig, majd azon áthaladva utána is fölfelé tart, ezért a plafon közelében éri el a tulsó falat. A fa bármely más pontjából kiinduló fénysugarak ugyancsak átmennek a lyukon, és jól meghatározott pontokban érik el a falat. Ennek eredményeképpen a falon kirajzolódik a fa (és a kert többi növényének) a feje tetején álló képe.

Alhazen a fényt parányi részecskékből állónak gondolta, amely részecskék a Napban vagy a Földön a lángokban keletkeznek, majd egyenes vonalban haladnak

¹⁵Kipróbálhatjuk, de soha ne nézzünk közvetlenül a Napba, mert az rövid idő alatt is maradandó károsodást okozhat a szemünkben!

és visszaverődnek az útjukba kerülő tárgyakról. A Nap fénye visszaverődik a kertben álló fáról, majd miután áthaladt a függönyön lévő lyukon, a lesötétített szoba faláról is visszaverődik, végül a szemünkbe jut, amit a camera obscura képeként érzékelünk. Alhazen rájött, hogy a fény nem terjedhet végtelen sebességgel, jóllehet nagyon gyorsan kell haladnia - arra gondolt, amikor egy egyenes bot végét ferdén vízbe merítjük, a bot úgy néz ki, mintha megtörne. Rájött, hogy ezt a fénytörésnek nevezett jelenséget az okozza, hogy a fény nem egyforma sebességgel terjed a levegőben és a vízben. A lencséket és a nem sík felületű tükröket is tanulmányozta, kimutatta hogy a lencse felületének görbülete a fénytörés jelensége révén lehetővé teszi a fénysugarak fókuszálását.

Európa azonban a XI. században még nem állt készen ezeknek a tanoknak a befogadására. Csak Johannes Kepler volt az, aki először vette át a stafétabotot Alhazentől, bár az ő nevét ma elsősorban azért ismerjük, mert felismerte a bolygók Nap körüli keringésének a törvényszerűségeit. Kepler 1571 és 1630 között élt. A XVII. század legelején Alhazen Opticae thesaurus-ában olvasható fejtegetéséből kiindulva a lyukkamerához hasonlítva leírta az emberi szem működését, ahol a fény a pupillán keresztül belép, majd a szem hátsó falán, a retinán létrehozza a külvilág képét. Évszázadokon keresztül megválaszolatlan maradt azonban az a kérdés, hogy miért nem a feje tetején állva látjuk a világot, jóllehet a retinán így képeződik le. René Descartes be is bizonyította, hogy a retinán valóban fordított állású kép keletkezik. A kísérletet egy elpusztult ökör szemgolyójával végezte, amelynek hátulját áttetszővé kaparta, és megfigyelte a retinán keletkező képet. Ma már tudjuk, hogy az emberi agy automatikusan korrigálja a képet, ugyanúgy, ahogyan egy, a feje tetején álló tévékészülékben is (elektronikus úton) megfordítható a kép állása.

Nagyjából ebben a korban (Descartes 1596-tól 1650-ig élt) robbanásszerűen megnőtt a tudósok fény iránti érdeklődése. Galilei, aki 1564-ben született (ugyanabban az évben, amikor William Shakespeare), és 1642-ben halt meg (ugyanabban az évben, amikor Isaac Newton született), hírért vette, hogy egy holland szemüvegkészítő 1608-ban feltalálta a távcsövet. Gyorsan elkészítette hát a saját távcsövét, amelyet az ég felé fordított. Ezzel megszületett a modern, távcsöves csillagászat tudománya. Nem sokkal később a mikroszkópot is feltalálták, ami lehetőséget adott a kutatóknak, hogy behatoljanak a nagyon parányi dolgok világába, éppúgy, ahogy a távcsővel a Földön kívüli világ, a Világegyetem egészének titkait fűrkészthették. Távcsöve segítségével Galilei 1610-ben felfedezte a Jupiter négy legnagyobb holdját; 1676-ban éppen ezeknek a holdaknak a mozgását tanulmányozva sikerült először megmérni a fény sebességét.

Ezt a trükköt egy dán csillagász, Olaf Römer hajtotta végre. Römer pontosan feljegyezte, mikor fedti el a Jupiter az egyes holdakat. Nyilvánvalóvá vált, hogy a fogyatkozások időpontját befolyásolja, hogy a Föld a Napnak ugyanazon az oldalán helyezkedik-e el, mint a Jupiter, vagy az átellenes oldalán. Römer a fogyatkozások időpontjában fellépő eltéréseket azzal magyarázta, hogy ha a Föld és a Jupiter a Nap átellenes oldalain tartózkodott, akkor a fénynek hosszabb időre volt szüksége a Jupiter-Föld távolság megtételéhez, mint amikor a Föld közelebb

volt a bolygóhoz. Mai mértékegységeket használva a Napból induló fénynek valamivel több mint nyolc percre van szüksége ahhoz, hogy 300 000 km/s sebességgel száguldvá elérje a Földet, vagyis hogy megtegye a földpálya átmérőjének a felét. Eszerint tehát a Jupiterholdak fogyatkozásainak maximális késése ennek a kétszerese, azaz valamivel több, mint negyed óra.

Ugyanabban az évtizedben, amikor Römer megmérte a fény sebességét, Angliában a tudomány színpadára lépett az az ember, akinek a munkássága nemcsak az optikát, hanem az egész természettudományt gyökeresen átalakította. Isaac Newtonról van szó, aki 1672-ben jelentette meg első tudományos dolgozatát, mégpedig éppen a fény természetéről.

Woolsthorpe-tól Cambridge-ig - és vissza

Newton kis híján egyáltalán nem lett tudós - legalábbis nem egyetemet végzett tudós és a Royal Society tagja. Koraszülöttként látta meg a napvilágot 1642 karácsony napján,¹⁶ a Lincolnshire-i Grantham közelében fekvő Woolsthorpe-ban. Parányi és beteges csecsemő volt, abban sem voltak biztosak, hogy életben marad, alig élte túl élete első hetét. Apja, aki ugyancsak az Isaac nevet viselte, még Newton születése előtt meghalt - ám talán ez a körülmény is közrejátszott abban, hogy végül Newton élete szerencsésen alakult. Amikor fia születése után három évvel anyja ismét férjhez ment, és a szomszéd faluba, North Withambe költözött, a gyereket anyai nagyszüleihez küldte. Isaacot megelőzően egyetlen Newton sem járt még iskolába, és nagyon valószínű, hogy ő sem lett volna kivétel a családi hagyomány alól, ha szabad kisbirtokos apja, aki még a nevét sem tudta leírni, életben marad. Akkor bizonyára a fiatal Isaac is a földművesek életét élte volna. Anyja családja, az Ayscough-k, valamivel magasabban állt a társadalmi ranglétrán, mint a Newtonok. Nagypapa, James Ayscough úriember volt, és Isaac anyjának, Hannah-nak volt egy bátyja, aki Cambridge-ben a Trinity College-ban végzett, és egy közeli parókián lelkeszi szolgálatot teljesített.

Newtonnak magányos gyermekkorra volt. Mostohaapja soha nem vette magához a házába. A helyi napköziotthonos iskolában elkezdhetette iskolai tanulmányait, így minden tekintetben színvonalasabb élet jutott osztályrészéül, mintha továbbra is a földműves Isaac Newton fiaként nevelkedett volna. Amikor mostohaapja 1653-ban meghalt, a fiatal Isaac anyja visszaköltözött Woolsthorpe-ba, és attól kezdve a fiú ismét az anyjával élt. A változás fölött érzett örömét bizonyára mérsékelte az a körülmény, hogy immár egy mostohaöccsével és két mostohahúgával kellett anyja szeretetén osztoznia. Éppen két évvel később beíratták a granthami középiskolába, ahol a helyi patikus, bizonyos Mr. Clark házában kapott szállást.

Magányossága és ismételt távolléte anyjától, amit csak súlyosbított az a tény,

¹⁶Az Angliában akkor még használatos régi naptár szerinti dátumról van szó. A kontinensen akkor már a pápa által bevezetett Gergely-naptárt használták, mert csak így tudták az évszakok változását és a naptárt összhangban tartani. Az új naptár szerint Newton 1643. január 4-én született.

hogy még csak nem is ismerte az apját, bizonyára hozzájárult Newton személyiségének szerencsétlen alakulásához - zárkózott és házsártos volt, nem volt képes könnyen elviselni mások ostobaságát, és sokszor keveredett különféle plágiumi vádaskodásokba és akadémiai veszekedésekbe az elsőbbségről. Mindamellet jól tanult és szokatlanul értelmesnek (bár határozottan különcnek) tartották, ám még egy komoly akadályt le kellett győznie, mielőtt végleg elindulhatott a tudományos hírnév és dicsőség felé vezető pályáján. Amikor 17 éves lett, anyja hazavitte őt Woolsthorpe-ba, mert meg akarta neki tanítani a gazdaság vezetését, amelyet szeretett volna teljes egészében át is adni a fiának. Ezen a pályán azonban Newton reménytelen esetnek bizonyult. Mialatt Hannah sikertelenül próbált földművest faragni a fiából, bátyja, William megpróbálta rávenni, hogy küldje vissza Isaacot az iskolába, ahol a fiú felkészülhet az egyetemi felvételre. A granthami iskolaigazgató, Mr. Stokes még erőteljesebben próbálta ugyanerről meggyőzni az anyát, felajánlotta, hogy a fiút a saját házában szállásolja el, és a tandíjat is mérsékelte volna, ha visszakaphatja derék tanítványát. 1660-ban, abban az évben, amikor II. Károly a 11 évig tartó parlamenti interregnum után visszakерült Anglia trónjára, Hannah beadta a derekát, és Isaac folytathatta tanulmányait Granthamben. Akkor már Cambridge volt a célja, ahová 1661 júniusában indult el. Onnan már nem volt visszaút.

A hivatalos tanterv Cambridge-ben az 1660-as években még az ókori görög filozófusok, elsősorban Arisztotelész munkáin alapult. Úgy tűnik, Newton megfelelő szorgalommal teljesítette az előírt kurzusokat, így 1665-ben megszerezte egyetemi diplomáját. Addigra azonban elolvasta néhány sokkal modernebb gondolkodó, többek közt Kepler, Galilei és Descartes műveit is, autodidakta módon jártasságra tett tehát szert a XVII. század közepének új természettudományában. Amikor 1665-ben Londonban kitört a pestisjárvány, a Cambridge-i Egyetemet bezárták, Newton pedig hazament Lincolnshire-be. Két évig maradt ott, végiggondolta, amit addig tanult, és kialakította saját elképzelését a Világegyetem működéséről. E két év alatt fejlesztette ki a differenciál- és integrálszámítást, saját gravitációelméletét, valamint előállt a fény és a színek elméletével is. Eredményeit azonban hosszú évekig nem adta közre. Newton számára elegendő volt, hogy a problémákat a saját megelégedésére megoldotta. Kollégái csak nagy nehéz-segek árán tudták rábeszélni (amikor rájöttek, milyen kincseket rejteget a fiókja), hogy tegye közkinccsé munkája gyümölcseit.

Az 1660-as évekre két egymással versengő elmélet alakult ki a fény természetéről. Az egyiknek Pierre Gassendi francia fizikus (aki 1592 és 1655 között élt) volt a fő szószólója; ő úgy tartotta, hogy a fény elképzelhetetlenül nagy sebességgel száguldó, parányi részecskék árama. A másik elgondolást Descartes támogatta, eszerint a fény terjedésekor semmi sem mozog az egyik helyről a másikra, hanem az egész Világegyetemet valamilyen („plenum”-nak nevezett) anyag tölti ki, amely nekinyomódik a szemnek. Ez a nyomás, vagyis a „mozgásra törekvés” hozta létre feltételezése szerint a látás jelenségét. A fénylő tárgyak, például a Nap, maguktól elfelé nyomták volna ezt a közeget. Ez a nyomás pillanatszerűen terjedt tova, és a fénylő tárgyra pillantó emberi szem azonnal érzékelte volna.

Mindkét elképzelésnek voltak azonban nehézségei. Ha a fény apró részecskék árama, akkor mi történik, ha két ember egymással szemben állva farkasszemet néz egymással? És ha a látást a plumban terjedő nyomás okozza, akkor (amint arra maga Newton is utalt a jegyzetfüzetében) az éjszaka futó embernek világosságot kellene látnia, hiszen a futó mozgása összenyomná a szeme előtt a feltételezett közeget.

Newton inkább azt az elképzelést támogatta, amely szerint a fény részecskék áramából áll (korpuszkulákból), nem utolsósorban azért, mert saját mechanikai törvényei segítségével sikerült magyarázatot adnia a részecskék viselkedésére. Úgy gondolta, hogy pontosan ugyanazokat a törvényeket alkalmazhatja a bolygók Nap körüli mozgására, az ágyúgolyó röppályájára vagy a fény részecskéinek mozgására. Bizonyos értelemben megpróbálta a fizika egyesített elméletét kidolgozni, több mint 300 évvel megelőzve ezzel korát. Ám 1661-ben, amikor Newton Cambridge-be utazott, Descartes rivális elméletének ígéretesebbek voltak a kilátásai.

Descartes fényelmélete eredeti formájában egy állandó, a szemre ható nyomást képzelt el. Csupán egy apró lépéssel kellett továbbfejleszteni az elméletet ahhoz, hogy a világító testekből kiinduló lökészerű nyomásváltozásokat is be lehessen építeni az elméletbe. Ezek a lökések hullámokat keltettek - ám nem a tó felszínén kialakuló fodrozódáshoz hasonlóakat, hanem a vízben haladó nyomáshullámnak megfelelőeket, amelyek akkor alakulnak ki, amikor kezünkkel a víz felszínére csapunk (és pontosan azonosak azokkal a mai tudásunk szerinti nyomáshullámokkal, amelyek révén a hang tovaterjed a forrásából). Az 1660-as évek elején legalább két tudós, Robert Hooke Angliában és Christiaan Huygens Hollandiában ezen a nyomon indult tovább a fény teljes hullámelmélete irányába.

Hooke-ról rövidesen bővebben is szólunk. Huygens többet érdemelne egy futó említésnél, minthogy a kor jelentős fizikusai között ő volt Newton mögött a második, ami nem kis teljesítmény, hiszen Newtont mind a mai napig a valaha élt legnagyobb tudósnak tartjuk.

Newton árnyékában

Huygens 1629-ben Hágában született. Családi körülményei meglehetősen különböztek Newtonétól. Apja diplomata és költő volt, a család tagjai hagyományosan az orániai királyi ház diplomáciai szolgálatában álltak. Descartes, aki fiatal korában az orániai herceg hadseregében szolgált, és 1628-tól 1649-ig Hollandiában élt, gyakori vendég volt Huygenséknél, ami Christiaan pályaválasztásában is közrejátszhatott. Matematikát és jogot tanult, és a családi hagyományok szellemében diplomáciai pályára készült. Ám csillapíthatatlan érdeklődést mutatott a természettudományok iránt, amelyek fejlődéséhez több területen is maradandóan hozzájárult. Távolról sem nevezhetjük dilettánsnak, hiszen olyan sikeres és olyan jól ismert volt, hogy amikor 1666-ban megalapították a Francia Királyi Tudományos Akadémiát, Huygenst meghívták a

hét alapító tag egyikének. Egészen 1681-ig maradt Franciaországban, akkor azonban kénytelen volt visszatérni a hazájába, részben rossz egészségi állapota miatt, részben pedig azért, mert a katolikus Franciaországban protestáns nézetei miatt vallási üldöztetésnek volt kitéve. Időnként külföldre utazott, például 1689-ben Londonba, ahol találkozott Newtonnal. Hágában halt meg, 1695-ben.

Egy vonatkozásban Huygens hasonlított Newtonra. Ő is gyakran késlekedett eredményei publikálásával. Az ő esetében azonban ennek a fő oka aprólékos pontossága volt, mindig a tökéletességre törekedett, kínosan ügyelt, hogy egyetlen „i”-ről se hiányozzék a pont, és minden „t” szára át legyen húzva, mielőtt nyomdába adta volna munkáját. Ez a részletekre irányuló, kínosan aprólékos figyelme nagyon sokat segített neki, amikor az ingaórákkal kezdett foglalkozni, és ezekkel kapcsolatban megtette első jelentős hozzájárulását a XVII. század természettudományához.

Bár Galilei már 1581-ben rájött, hogy az inga lengése mindig szabályos ritmust követ, bármekkora is az inga kilengése, mégsem sikerült senkinek az inga szabályos lengését egy pontosan járó óra vezérlésére felhasználni, míg végül az 1650-es években Huygens állt elő a gyakorlatban is használható tervekkel. Az első, általa tervezett órát 1657-ben építették meg, egy évre rá már megszokott látvány volt egész Hollandiában a toronyóra. A találmány az egész természettudományt átalakította, hiszen lehetővé tette a pontos időmérést, ami kritikus jelentőségű volt például, amikor Römer megmérte a fény sebességét, vagy más csillagászati mérések esetében is. A toronyórától még egy lépéssel messzebbre jutott, amikor 1674-ben kidolgozta az első, működőképes zsebórát, amelyet már rugó hajtott, és amelynek járását inga helyett a billegőkerék szabályozta (bár Hooke tőle függetlenül kitalálta ugyanezt a megoldást, Huygens készítette az első működőképes modellt).

Huygens távcsöveket is tervezett, sőt maga is végzett csillagászati megfigyeléseket. Ő fedezte fel 1655-ben a Titánt, a Szaturnusz legnagyobb holdját, és ő volt az első, aki helyesen írta le a Szaturnusz gyűrűinek természetét. Csillagászati munkássága révén, és annak köszönhetően, hogy egyre tökéletesebb távcsöveket szeretett volna készíteni, érdeklődése a fény tanulmányozása felé fordult. Ez vezetett el legjelentősebb tudományos eredményéhez, a fény teljes részletességgel kidolgozott hullámelméletéhez. Az elmélet lényegében már 1678-ban készen állt, de teljes terjedelmében csak 1690-ben publikálta. Elmélete képes volt magyarázatot adni arra, miként verődik vissza a fény a tükör felületéről, továbbá a fénytörés jelenségére, amikor a fény levezből vízbe vagy üvegbe lép át. Descartes elgondolásából kiindulva a fényt a részecskék valamiféle lökdösődő mozgásaként képzelte el, ahol a fényforrásból gömbszimmetrikus nyomáshullámok indulnak ki és terjednek tova valamilyen zavar formájában. Elmélete ezenkívül egy roppant fontos előrejelzést is tett: a fénytörés magyarázatakor feltételezte, hogy a fény a sűrűbb közegekben (például üvegben vagy vízben) lassabban halad, mint a ritkább közegben (például a levegőben).

Huygens szerencsétlenségére azonban tudományos tekintélye elhalványult

Newton árnyékában. Newton lélegzetelállító eredményei a „természetfilozófiában” - mozgástörvényei és gravitációelmélete - 1687-ben jelentek meg, híres, Principia című könyvében. Egyes, a fényre vonatkozó elképzelései ugyan már 15 évvel korábban nyomtatásban napvilágot láttak, ám a teljes elméletet csak 1704-ben publikálta, aminek rövidesen az okát is megismerjük. Elsősorban Newton óriási tudományos tekintélyének köszönhetően, amiért őt kora legnagyobb tudományos géniuszának tartották, a fényről vallott nézeteit, akárcsak mozgástörvényeit és gravitációelméletét a XVIII. században is szentírásnak tekintették. Newton fényről vallott nézetének egyik eleme az volt, hogy szerinte a fény apró részecskék formájában terjed - ebből következően Huygensnek nyilvánvalóan nem lehetett igaza. Néha azonban a legnagyobb zsenik is tévedhetnek, ráadásul a korpuszkuláris hipotézis nem is a legjelentősebb része Newton fény elméletének. Sokkal fontosabbnak tekintjük színelméletét, ezek a kutatásai állították őt először kora tudományos világa érdeklődésének középpontjába. És akárcsak Huygens fénnel kapcsolatos munkásságának, Newton színelméletének is fontos következményei voltak a csillagászatban.

Newton világképe

Newton színelmélete nemcsak azért fontos, mert megállapításai helyesnek bizonyultak, hanem azért is, mert tanulságos az a módszer, ahogyan következtetéseikhez eljutott. Newton előtt a filozófusok jobbra tisztán gondolati úton jutottak el a természetről felállított elképzeléseikhez. Descartes például elgondolkodott azon, miként juthat el a fény a fényt kibocsátó testektől a szemig, azonban hipotézise ellenőrzése érdekében egyáltalán nem végzett kísérleteket. Természetesen nem Newton volt az első kísérletező - hiszen például Galilei nemcsak a lejtőkön leguruló golyókkal kísérletezett, hanem az inga lengésével kapcsolatos megállapításai során is hivatkozott a kísérleteire. Mindamellet Newton volt az első, aki lefektette annak a módszernek az alapjait, amelyet mindmáig a természettudomány kutatási módszerének tekintünk - az ötletek (hipotézisek), a megfigyelések és a kísérletek szerves egységét, amelyen a modern természettudomány nyugszik. Newton színelmélete azokon a kísérleteken alapult, amelyet kényszerű távolléte alatt végzett, amikor a pestisjárvány miatt el kellett hagynia Cambridge-et. 1665-re már jól ismert ténynek számított, hogy a napfény - háromszög alakú üvegprizmán keresztülbocsátva - szivárványszerű színekre bontható. A jelenség hagyományos magyarázata azon az Arisztotelésztől származó elképzelésen alapult, melynek értelmében a fehér fény a fény tiszta, változatlan formáját képviseli, amelyet az üvegen történő áthaladás eltorzít. Amikor a fény belép a prizmába, megváltozik a haladási iránya, majd az üveg belsejében egyenes vonalban halad a túlsó határfelületig, ahol ismét megtörik, amikor kilép az üvegből a levegőbe. Eközben a fénysugár szétterjed, egyetlen fehér fényfolt helyett színes sávot látunk. Ha a háromszög keresztmetszetű prizmához viszonyítva vizsgáljuk, mi történik a fénnel, azt látjuk, hogy a háromszög csúcsához legközelebb haladó fénysugarak teszik meg a legrövidebb távolságot az üvegben, ezek a sugarak vörös fényként lépnek ki a prizmából. A csúcstól távolabb, ahol az üveg már vastagabb, a valamivel erősebben megtörő sugarak kicsit hosszabb utat tesznek meg az üvegben, a leghosszabb utat bejáró

sugarak ibolyaszínû fényként hagyják el az üveget. A kettő közt feltűnnek a szivárvány színei - a vörös, a narancs, a sárga, a zöld, a kék és az ibolya. Ha az elsötétített szobába csak a függönybe vágott kicsiny lyukon keresztül engedjük be a fényt (hasonlóan a camera obscura esetében leírt elrendezéshez) és a fénysugár útjába prizmát tartunk, a szemközti falon megjelenik a színekép.

Arisztotelész felfogása szerint az üvegben a legrövidebb utat megtevő fehér fény torzul a legkevésbé, ebből lesz a vörös fény. Az üvegben egyre hosszabb utat befutó sugarak egyre nagyobb mértékben módosulnak, ezért ezek a szivárvány többi színeire módosulnak, a sárgától egészen az ibolyáig.

Newton ténylegesen ellenőrizte saját elképzeléseit, kísérleteihez saját maga által csiszolt prizmákat és lencsákat használt, különböző alakú lencsék használatával megpróbálta a színváltozást minimálisra csökkenteni. Ő volt az első, aki különbséget tett a különböző színû fénysugarak között, és ő nevezte meg a színekép hét színét (a színeképet önkényesen osztotta hét színre, mert a hét prímszám, amelynek bizonyos misztikus vonatkozásai is vannak; ezért vezette be a kék és az ibolya közé az indigónak nevezett színt - ha az olvasónak nehézséget okoz ezt megkülönböztetni a kéktől és az ibolyától, megnyugtathatjuk, nincs egyedül!).

A legfontosabb kísérletben, amelyet Newton elvégzett, egyszerûen egy második üvegprizmát helyezett a fény útjába, az első mögé, de ahhoz képest a feje tetejére állítva. Az első, az alapján álló prizma a szivárvány színeire bontotta a fehér fényt, majd a második, a csúcsán álló prizma a színes sugarakat fehér fényfoltta egyesítette. Bár a fénysugár újabb, vastag üvegrétegen haladt keresztül, nem vált még torzítottabbá, hanem visszatért eredeti, tiszta állapotába.

Newton felismerése szerint a kísérlet eredménye arra utal, hogy a fehér fény egyáltalán nem „tisztá”, hanem a szivárvány összes színének keveréke. A különböző színek eltérő mértékben törnek meg a prizma hatására, ám az összes szín eredetileg is jelen volt a fehér fényben. A felismerés forradalmi jelentőségû volt, egyrészt azért, mert ellentmondott az arisztoteleszi filozófia egyik alapvető tételének, másrészt pedig azért, mert a megállapítás szilárd, kísérleti alapon nyugodott. Newton azonban nem sietett a világ tudomására hozni felfedezését. A fény természetére vonatkozó, 1665-ben született felismerése inkább a csillagászati távcsövek készítésének új megközelítési módjára ösztönözte őt.

A nagy, lencsés távcsövek építésének egyik nagy problémáját az jelentette, hogy ezekben a lencse nemcsak összegyűjtötte, hanem eközben színeire is bontotta a fényt. Emiatt a távcsövel vizsgált égitest képe elmosódottá és színessé vált, amelyből mindenféle színes nyúlványok látszottak kiindulni. A jelenség színi hiba (kromatikus aberráció) néven jól ismert, mint a távcsöves vizsgálatokat zavaró egyik kényelmetlen körülmény. Newton felismerte, hogy nehéz lenne olyan lencserendszert konstruálni, amelyik mentes a színi hibától (nehéz, de nem lehetetlen, az úgynevezett „akromatikus” lencsék kiküszöbölik ezt a problémát, ezeket a lencsákat két, különböző fénytörési tulajdonságú üvegből készítik, az ilyen kettős lencsét használó távcső mentes a színi hibától). Newton ezért olyan

távcsövet készített, amelyik nem lencsékkel, hanem görbült felületű tükörrel gyűjti össze a fényt - azaz feltalálta a tükrös távcsövet.

Newton tükrös távcsövének működése egy szellemes ötleten alapult, először a távcső végében elhelyezett, görbült felületű tükörről verődnek vissza a fénysugarak, innen egy kisebb, 45 fokos szögben megdöntött síktükörre esnek, amelyik a képet a távcső tubusának oldalába fúrt lyukon keresztül a csövön kívülre vetíti. A megfigyelő ebbe a lyukba belenézve figyelheti meg a csillagokat anélkül, hogy fejét a vizsgált csillag irányába kellene fordítania. Az ötlet a maga egyszerűségében ragyogó volt, ám az akkoriban rendelkezésre álló eszközökkel csak fáradságos munka árán lehetett pontos felületű tükröt készíteni. A tapasztalt modellkészítő Newton azonban egymaga sikeresen oldotta meg ezt a feladatot. Munkája eredményeképpen elkészült egy körülbelül 20 cm hosszú műszer, amelyik kilencszer nagyobb képet adott, mint a nála négyszer hosszabb lencsés távcsövek - ráadásul színi hiba nélkül.

Eközben elmúlt a pestisveszély, ismét megnyitották az egyetemet, így Newton visszatérhetett Cambridge-be. 1667-ben a Trinity College tagjává választották. Ugyanabban az évben Anglia háborúba keveredett Hollandiával, és a holland hadiflotta sikeresen támadta az angolokat a Temzén. Az ágyúzás hangja Cambridge-ig elhallatszott, ahol természetesen mindenki tisztában volt a csatazaj okával. Newton nagy hatást gyakorolt kollégáira, amikor (mint később kiderült, helyesen) a hangok alapján arra a következtetésre jutott, hogy a hollandok nyerték az ütközetet. Érvelése szerint az ágyúzás hangja egyre erősödött, amiből arra lehetett következtetni, hogy a csata helyszíne egyre közelebb tolódik Cambridge-hez, vagyis az angolok kénytelenek visszavonulni.

Newton matematikai munkásságának köszönhetően 1669-re már Cambridge-en kívül is ismertté vált. Ugyanebben az évben az 1663-ban kinevezett Isaac Barrow, a matematika első Lucas-féle professzora a Cambridge-i Egyetemen kifejezetten Newton javára lemondott tisztségéről. Barrow, bár kiváló matematikus volt, másfajta terveket dédelgetett. Hamarosan a király első lelkésze, majd a Trinity College igazgatója lett. Elegendően nagy befolyással rendelkezett Henry Lucas örökségének gondozóira ahhoz, hogy az örökségből létesített Lucas-féle tanszék élére, saját utódként újra a Trinityből nevezzenek ki valakit, aki ráadásul már tanúbizonyságot tett figyelemreméltó matematikai képességeiről.

Ez a kinevezés stabilizálta Newton helyzetét Cambridge-ben, ám az állás feltételeként rendszeresen előadásokat kellett tartania az egyetemen. Első kurzusa témájául nem a matematikát, hanem az optikát választotta, azon belül különös figyelmet fordított a távcsövekben fellépő kromatikus aberráció problémájára. Ugyanebben az időszakban büszkén mutogatta saját készítésű távcsövét kollégáinak Cambridge-en és a környékén. A Newtontól származó legkorábbi, fennmaradt levelet (egy ismeretlen címzettnek) 1669 februárjában írta, a levél legnagyobb részében a távcső leírása olvasható.

A figyelemreméltó, új műszerről szóló hírek 1671 végén eljutottak a Royal Societybe is (amelyet formálisan 1662-ben alapítottak meg, jóllehet informálisan

már 1645 óta létezett). A Királyi Társaság titkára, Henry Oldenberg is látni szeretne volna a távcsövet. Newton kérésére Barrow Londonba szállította a műszert. Oldenberg 1672 januárjában behízelgő hangú levélben biztosította Newtont nagyrabecsüléséről találmánya miatt, tájékoztatta továbbá, hogy a távcső híre már az akkor éppen Párizsban dolgozó Huygenshez is eljutott. Newton, mint az új távcsőtípus feltalálója tehát híressé vált a kontinentális Európában is. Találmányának köszönhetően 1672. január 11-én a Royal Society tagjává választották, néhány héttel később pedig - egy Oldenbergnek írott, és a színelméletét ismertető levél formájában - első fizikai tárgyú tudományos cikke is megjelent. A levél a Royal Society kiadásában megjelent Philosophical Transactions folyóiratban 1672. február 19-én látott napvilágot. Ennek következtében robbant ki Newton első, híres akadémiai vitája.

Robert Hooke, aki 1635-ben született és 1703-ig élt, abban az időben a Royal Society kísérleteinek felügyelője volt. A tudományos közélet ismert alakjának számított, saját elképzelései voltak a fény és a színek természetéről (1665-ben publikálta a fény általa kidolgozott hullámelméletét, amely azonban Huygens munkájánál kevésbé volt teljes), és mindig erős késztetést érzett saját műve elsőségének kinyilatkoztatására. Ezért aztán Newton levelére leereszkedő stílusban válaszolt, elutasította azt az elképzelést, miszerint a fény korpuszkulákból állhat, ugyanakkor nem vette észre, hogy a színelmélet valójában nem a korpuszkuláris hipotézisen alapul. Rosszmájú megjegyzések szerint Hooke arra a következtetésre jutott, hogy ami Newton munkájában eredeti, az hibás, ami viszont helyes, az nem eredeti.

Az emiatt kialakuló éles vitának két következménye lett. Egyrészt ennek hatására Newton szinte teljesen visszavonult a tudományos közéletből, és Cambridge-ben kizárólag csak a maga dolgával foglalkozott. Éveken keresztül semmit sem volt hajlandó publikálni (és az optika teljes elméletét egészen Hooke haláláig megtartotta saját magának, és csak akkor publikálta, amikor már biztos lehetett benne, hogy az övé az utolsó szó). Másrészt ez a vita vezetett Newton híressé vált kijelentéséhez, mely szerint „Ha távolabbra láttam másoknál, azt azért tehettem, mert óriások vállán álltam.” - éles hivatkozás Hooke alacsony termetére, amiből az is következik, hogy Hooke-ot szellemi érteimben is kicsinek tartotta.¹⁷

Színelméletének egy másik bírálójával folytatott levelezésében azonban Newton bepillantást enged munkamódszerébe - ami a természettudományos kutatás módszerévé vált. A francia jezsuita Ignace Gaston Pardies Párizsból írt Newtonnak. Levelében számos kérdést vet fel az elméletet illetően, amelyeket Newton illő tisztelettel fogad. Ahelyett, hogy mint örültséget, figyelembe se vette volna Pardies megjegyzéseit, válaszlevelében részletesebben kifejti érveit:

¹⁷Az óriások emlegetésének semmi köze Newton gravitációelméletéhez, mert egy oke-nak 1675-ben, tehát 12 évvel a Prinápia megjelenése előtt írott leveléből származik. A Hooke-kal folytatott vita részleteit illetően lásd Gribbin: In Search of the ISe of Time, első fejezetét, illetve magyarul: Gribbin: A tudomány története 1543-tól napjainkig (Science: A History) Akkord Kiadó, 2004.

„A filozófia művelése legjobb és legbiztosabb módszerének az tűnik, ha előbb alaposan megvizsgáljuk a dolgok tulajdonságait, és ezekről a tulajdonságokról kísérleti úton is meggyőződünk. Ezután apránként áttérhetünk a megfigyelt jelenségeket megmagyarázó hipotézis felállítására. A hipotéziseket ugyanis csak a dolgok tulajdonságainak magyarázatára használhatjuk, nem tételezhetjük fel, hogy hipotézisünk határozná meg valaminek a tulajdonságait. Mindezt csak addig tehetjük, amíg a hipotézisünk választ ad a kísérlet eredményeire.”¹⁸

Pontosan erről szól a természettudomány. Nem számít, milyen csodálatos hipotézist állít fel valaki; ha nincs összhangban a kísérletek eredményeivel, akkor nem lehet igaz. Newton fényelmélete (bár talán helyesebb lenne a hipotézis szót használni a megjelölésére, jóllehet Newton megsértődött, amikor Hooke így minősítette elképzeléseit) például magyarázatot ad a fénytörés jelenségére. Ezt az egyik közegből a másikba lépő fény sebessége megváltozásának tudja be. Ugyanakkor Huygens elméletével ellentétben a korpuszkuláris elmélet szerint a fénynek a sűrűbb közegben gyorsabban kellene haladnia. Ez egyértelmű választási lehetőséget biztosít a két elgondolás között. Ha Newton megérte volna azokat a kísérleteket, amelyek egyértelműen bizonyították, hogy a fény a sűrűbb közegekben valójában lassabban terjed akkor minden bizonnyal elfogadta volna a kísérleti bizonyítékokat, és belátta volna a fény hullámterjedését.

Amellett, hogy megalkotta a világ működése tudományos vizsgálatának tudományos módszerét, Newton (Huygensszel és más kortársaival együtt) megalkotta a valóság első paradigmáját, vagyis modelljét. Ennek értelmében a Világegyetem pontos törvényeknek engedelmeskedve működik. Az egymástól teljes mértékben különböző jelenségek, mint például a bolygók mozgása a Nap körül vagy a fény törése egyaránt megmagyarázhatók ezeknek a törvényeknek az alkalmazásával, ahelyett, hogy hóboros istenek szeszélyeire kellene hagyatkoznunk.

A XVII. század természettudománya által ránk hagyott világszemléletet gyakran - találóan - az „óraműként működő Világegyetemenként” emlegetik, mert eszerint a világ kérlelhetetlenül szigorú törvényeknek engedelmeskedik. Ebben az értelemben persze nem szabad valamilyen modern karórára gondolnunk, amelyik egyszerűen csak a másodpercek múlását számlálja. Sokkal inkább egy XVII. századi katedrális óraszerkezetét kell magunk elé képzelni, amelynek működését ugyan a Huygens tervei szerint készített inga szabályozza, ám az óramű egymásba kapcsolódó fogaskerekei és tengelyei nemcsak az idő múlását jelzik, hanem számos bonyolult mechanikus rendszert is működtetnek, amelyek bizonyos időpontokban harangjátékokat szolgáltatóknak meg vagy szentek szobrai felvonultató mozgóképeket jelenítenek meg. Ilyen az a bonyolult óramű, amelyhez hasonlónak képzelte el a XVII. századi természettudomány a bolygók Nap körüli mozgását és a természet egyéb jelenségeit.

Newton örökségének fontos eleme az az elképzelés, mely szerint a Világegyetemben mindennek előrejelezhető a viselkedése, éppúgy, ahogyan a

katedrális toronyóráján is az előre megszabott rendben jelennek meg a képek és a szobrok. Ugyancsak Newton öröksége az a tény, miszerint a Világegyetem működésének megértéséhez semmi másra nincs szükség, csak ezeknek a viszonylag egyszerű, az emberi értelem által könnyen felfogható törvényeknek az ismeretére. Ezeknek az eredményeknek a fényében jelentéktelenné válik az a körülmény, hogy a tudomány fejlődésének következő lépéseként bebizonyosodott, hogy a Newton-féle korpuszkuláris elmélet hibás. Mindamellett ez fontos lépés volt.

Young elképzelései

Már Newton korában is létezett közvetlen bizonyíték a fény hullámként történő terjedésére. A bizonyíték azonban gyenge lábakon állt, az ide vonatkozó munkát alig ismerték, és a jelenség magyarázata sem volt minden részletre kiterjedő. Francesco Grimaldi (1618-1663) olasz fizikus munkájáról van szó, aki Newtonhoz hasonlóan az elsötétített szobába csak egy apró lyukon beeresztett napfény tulajdonságait tanulmányozta. Megállapította, hogy amikor a fénysugár egy második, kis lyukon is áthaladt, és azután esett a felfogóernyőre, akkor az ernyőn létrejövő fényfolt valamivel nagyobbban látszott, mint amikor a második lyukon nem kellett áthaladnia a fénynek, továbbá a foltot színes sugarak vették körül. A második lyukon való áthaladás következményeképpen a fénynyaláb kissé széttartóbbá vált, méghozzá a fény különböző színű összetevőinek eltérő mértékben változott meg a széttartása.

Grimaldi azt is megállapította, hogy ha egy kis akadályt helyez a fény útjába, akkor az ernyőn keletkező árnyékfolt pereme elszíneződik, és a fény betüremkedik az árnyékos részre. Fontos, hogy a fény behatolt az árnyékos részre, méghozzá a különböző színű sugarak más-más mértékben. Mindkét hatás nagyon kicsi, de gondos megfigyeléssel és pontos méréssel egyértelműen kimutatható. Grimaldi a jelenségcsoportnak a diffrakció (fényelhajlás) nevet adta - ez volt a visszaverődés és a fénytörés mellett a harmadik mód, ahogyan a fény haladási iránya megváltozhatott. Grimaldi diffrakcióval kapcsolatos munkájának eredményei azonban csak 1665-ben, két évvel a szerző halála után jelentek meg nyomtatásban, így Grimaldi már nem tudott a hullámelmélet fellett érvelni, amikor Newton elképzelései hatalmukba kerítették a tudományos világot. Hooke ugyancsak megállapította, hogy a fény nem pontosan egyenes vonalban terjed, hanem kissé behatol az útjába helyezett test által vetett árnyék területére. Azt azonban már láttuk, hogy ő miért nem érvelt a hullámelmélet mellett, amikor Newton közreadta az optika teljes elméletét.

Bár a XVIII. században Newton felfogása uralta a tudományos közgondolkodást, a fény hullámelméletének azért akadtak támogatói. Az elképzelés legtekintélyesebb támogatója Leonhard Euler svájci matematikus volt, aki 1707-ben Baselben született, és néhány hét híján húszéves volt, amikor Newton 1727-ben meghalt. Euler volt minden idők egyik legnagyobb matematikusa, akit az elvont matematikai alap kutatás mellett az alkalmazott

matematikai problémák is érdekelték, így többek között az árapály jelenségének vizsgálatával, a folyadékok mechanikájával és a bolygók mozgásának Newton törvényei alapján történő kiszámításával is foglalkozott. Néha azonban a legnagyobb tudósok is követhetnek el ostoba hibákat. Amikor Szentpétervárott a matematika professzora volt, 1730-ban a jobb szemére megvakult, mert csillagászati megfigyelései közben a Napba nézett. Harminc évvel később, amikor (Nagy Katalin cárnő uralkodása alatt) a Tudományos Akadémia igazgatójaként visszatért Szentpétervárra, szürkehályog következtében a másik szemére is megvakult, ennek ellenére a hivatalában maradt és 1783-ban bekövetkezett haláláig minden feladatát ellátta. Matematikusként élete utolsó 15 évében is aktív maradt, a számításokat teljes egészében fejben végezte, és az eredményeket lediktálta az asszisztensének. Még 76 éves korában bekövetkezett halála napján is ideje egy részét a nem sokkal korábban feltalált hőlégballon emelkedési törvényeinek kiszámításával töltötte.

Euler fényelmélete 1746-ban jelent meg, a két szentpétervári tartózkodása közötti időben, amikor Nagy Frigyes berlini Tudományos Akadémiáján dolgozott. Rámutatott az összes nehézségre, amelyek a fény részecskék áramaként történő felfogásával kapcsolatban felmerültek (többek között a diffrakció magyarázatának problémájára), és párhuzamba állította a fény rezgéseit a hanghullámok rezgéseivel.

Addiga a rezgést végző közeget már nem „plenumnak”, hanem „éternek” nevezték. Egy az 1760-as években írott levelében kifejtette, hogy a napfény „olyan az éterhez képest, mint a hang a levegőhöz képest”, a Napot „fényt kibocsátó csengő”-höz hasonlította.¹⁹ Ez azonban nem győzte meg a világot. Nyilvánvalóan a hullámelmélet csak akkor tudta volna kiszorítani pozíciójából a korpuszkuláris elméletet, ha újabb kísérleteket sikerült volna elvégezni az igazolására. Newton korpuszkuláris fényelméletére pontosan az a módszer mérhette volna a döntő csapást, amelyet Newton a tudományos kutatás paradigmájaként fogalmazott meg.

Az első lépést ezen az úton Thomas Young brit fizikus tette meg, aki 1773-ban született, így csak 10 éves volt Euler halálakor. Fontos az életkor, mert Young csodagyerek volt, aki már élete első tíz évében több tudást gyömöszölt magába, mint sokan mások egész életük alatt. Kétéves korában már tudott olvasni, és csak úgy falta az őt rajongva szerető nagyapjától kapott könyveket. Hatévesen már beszélt latinul, majd elsajátította a görög, a francia, az olasz, a héber, a káldeus, a szír, a szamáriai, az arab, a perzsa, a török és az etióp nyelvet - mindezt 16 éves koráig. Fiatal korában (amint a megtanult nyelvek sora is igazolja) elsősorban a régészet és az ókori történelem iránt érdeklődött, bár tulajdonképpen minden érdekelt. 1792-ben, 19 éves korában kezdett orvostant tanulni, az volt a szándéka, hogy nagy-nagybátyja londoni praxisához csatlakozik. Londonban, Edinburgh-ban és Göttingenben tanult, ahol 1796-ban szerezte meg orvosi diplomáját. Első éves orvostanhallgató korában Young magyarázatot adott a szem működésére, miként fókuszálja a szem a fénysugarakat (azaz hogyan változtatják

19 Wézi Zajonc: Catching the Light, 99. oldal.

meg az izmok a szemlencse alakját). Ennek eredményeképpen 21 éves korában, még egyetemi hallgatóként a Royal Society tagjává választották.

Miután megszerezte orvosi diplomáját, egy ideig Németországban utazgatott, majd két évig Cambridge-ben dolgozott különféle tudományos problémákon. Sokoldalúságára való tekintettel itt ragadt rá a „Fenomén” Young becenév. 1800-ban visszatért Londonba, hogy ott folytasson orvosi gyakorlatot. 1811-ben a Szent György Kórház orvosa lett, amely állását 1829-ben bekövetkezett haláláig megtartotta. Az orvostudomány azonban csak egyetlen volt az őt érdeklő tudományterületek közül.

Young a szem szaruhártyája egyenetlen görbületével helyes magyarázatot adott a szemtengelyferdülés (asztigmatizmus) néven ismert látáshibára. Elsőként értette meg, hogy a színlátás a három alapszín (vörös, zöld és kék) kombinációjának eredményeképpen jön létre, mégpedig úgy, hogy az egyes alapszíneket a szemben különböző receptorok érzékelik. Fontos eredményeket ért el a fizikában is, megbecsülte a molekulák méretét. Mindemellett a Royal Society nemzetközi titkáráként működött (ahol nyilván jó hasznát vette nyelvtudásának). 1815-től visszatért korábbi érdeklődési területére, és elsősorban az ókori történelem kérdései foglalkoztatták. Egyiptológiai tárgyú cikkeket jelentetett meg, és közreműködött az 1799-ben a Nílus torkolatvidékén talált rosette-i kő szövegének megfejtésében (valószínűleg Young vezető szerepet vállalt az írás megfejtésében, bár ezért a munkájáért semmiféle elismerés nem érte, mert eredményeit 1819-ben anonim cikkben publikálta, az Encyclopaedia Britannica kiegészítő kötetében). Mindennek ellenére, vagy inkább mindezen felül, Young leginkább a fény interferenciájával kapcsolatban végzett kutatásainak köszönhetően vált híressé.

Az interferenciára vonatkozó első kísérleteit Cambridge-ben töltött évei alatt, 1797 és 1799 között végezte, ám ezt a munkát Londonba történt visszatérése után is folytatta. A XIX. század elején Young világos és pontos összefoglalót készített kísérleteiről. A kételkedő brit tudományos közvélemény előtt a fény hullámelmélete mellett foglalt állást és érvelt. Young hajtotta végre (sőt valójában kitalálta) azt az alapvető interferenciakísérletet, amelyről könyvünk Bevezetésében már részletesen volt szó. A kísérlet két változatában két tűszúrásnyi lyukon, illetve két keskeny résen engedte át a fényt. Bizonyos értelemben még fontosabb, hogy a hullámelmélet segítségével magyarázatot adott Newton néhány kísérletének eredményére. Rájött, hogy a fény minden egyes színe meghatározott hullámhossznak felel meg, továbbá megállapította, hogy a fénytörés vagy a diffrakció nagysága a fény hullámhosszától függ. E tudás birtokában, Newton saját kísérleti eredményeit felhasználva kiszámította, hogy a vörös fény hullámhossza (mai mértékegységekben kifejezve) $6,5 \cdot 10^{-7}$ méter, az ibolyaszínűé pedig $4,4 \cdot 10^{-7}$ méter. Ezek a számok jól egyeznek a mai mérésekkel, ami nemcsak arra mutat, milyen kiváló elméleti fizikus volt Young, hanem arra is, milyen kitűnő kísérletező volt Newton. A számok arra is rávilágítanak, miért telt olyan hosszú időbe, mire sikerült bebizonyítani a fény hullámtermészetét. Ezek a hullámhosszak ugyanis parányiak - körülbelül a méter fél milliommód részével egyenlőek - márpedig a diffrakció mértéke durván a szóban forgó hullámhosszak

nagyságrendjébe esik. A tárgyak széle mellett lehaladó fénysugár csupán a méter néhány milliommód részével hajlik el. Azt azonban csakis a hullámok képesek megmagyarázni, ha mégoly kicsi is a hullámhosszuk, ami a kétréses kísérletben történik.

1807-ben, pontosan 80 évvel Newton halála után Young a következő szavakkal összegezte a kétréses kísérlet eredményét:

„A (mintázat) közepe mindig világos, ennek két oldalán a világos sávok olyan távolságban vannak, hogy az egyik nyílásból ideérkező fénynek pontosan annyiival kellett hosszabb utat befutnia a másik nyílásból ugyanide érkező fénynél, ami egy, két, három vagy több feltételezett hullámmal szélességével (hullámhosszal) egyenlő. A közbeeső sötét sávok a feltételezett hullámmal felének felelnek meg, a különbség itt másfél, két és fél hullám, és így tovább”.²⁰

A leírás tökéletesen pontos. Tíz évvel később Young felvetette, hogy a fényhullámok transzverzálisak (azaz a hullámban tovaterjedő rezgés a terjedés irányára merőleges irányú), nem pedig longitudinálisak (ezekben a haladás irányába eső sűrűsödések és ritkulások terjednek, ilyen például a hanghullám, vagy azok a hullámok, amelyeket a tangó-harmonikázás közben a fújtatással keltünk).

Azt gondolhatnánk, hogy mindez elegendő bizonyítékot jelentett a fény hullámtermészete mellett. Ám még Young sem volt képes meggyőzni kora tudományos közvéleményét arról, hogy Newton tévedett a fény természetét illetően. Egyrészt sokan úgy érezték, hogy határozottan hazafiatlan magatartás lenne, sőt talán még becstelenségnek is számítana még a feltételezés is, hogy Newton bármiben is tévedhetett. Másrészt Young sok kollégája számára egész egyszerűen felfoghatatlan volt az a kijelentés, miszerint két fénysugár összeadásával sötétséget kaphatunk. Számunkra már természetes ez az elképzelés, akárcsak a kétréses kísérlet, amelynek tisztán a fény hullámtermészetével történő magyarázata a legkevesbé sem meghökkentő. Ám a XIX. század elején még egészen más volt a közfelfogás, akkor az volt a magától értetődő, hogy két fénysugár összeadásakor a fényesség megnő. A két fénysugár összeadásakor előálló sötétség Young egyik kortársának szavai szerint „az egyik legfelfoghatatlanabb feltevés volt, amellyel az emberi hipotézisek történetének tanulmányozása során találkoztam”.²¹ Talán nem véletlen, de a végső „nem brit” csapást egy francia mérte Newton korpuszkuláris elméletére, akinek nem volt tudomása Young munkájáról (ami egyáltalán nem meglepő, ha arra gondolunk, hogy az 1799 és 1815 közötti rövid időszaktól eltekintve Franciaország és Anglia folytonosan háborúban állt egymással).

Augustin Fresnel 1788-ban a normandiai Broglie-ban született. 1809-ben mérnöki diplomát szerzett, és Franciaország különböző részein a kormány szolgálatában különféle útépitéseken dolgozott. Az optika iránti érdeklődése csupán hobbi volt,

20 Idézi Baierlein: Newton to Einstein, 95. oldal.

21 Henry, Lord Brougham, idézi Zajonc: Catching the Light, 110. oldal.

ezért nem is tartozott a tudósok azon körébe, akik egyáltalán tudomást szerezhettek Young munkásságáról a Nagy-Britannia és Franciaország között dúló folyamatos háborúk rövid szünetében. Amikor Napóleon vereséget szenvedett és Elba szigetére száműzték, Fresnel sietett royalistának nyilvánítani magát. Amikor Napóleon 1815-ben rövid időre, a „száz nap”-ként ismert időszakra visszatért száműzetéséből, Fresnelt vagy eltávolították állásából, vagy pedig tiltakozásul ő maga mondott fel (a beszámolók ellentmondanak egymásnak ebben a vonatkozásban). Akárhogy is esett, visszaküldték Normandiába, ahol házi őrizetben tartották. Itt elég ideje volt félkész ötleteiből egybefüggő, teljes elmélet kidolgozására. Amikor Napóleont végérvényesen elűzték a hatalomból, visszatért mérnöki munkájához. Ettől kezdve az optikával ismét csak hobbiként, a munkája mellett foglalkozott.²² Szabadidejében és az említett kényszerű szünetben azonban éppen elég fontos eredményre jutott ahhoz, hogy végérvényesen bizonyítani tudja a fényterjedés részecskemodelljének tarthatatlanságát.

Fresnel, Poisson és a fényes pont

Bár nem túl meglepő, hogy Fresnel 1815-ben nem ismerte Young eredményeit, az viszont már valamivel meglepőbb, hogy Huygens vagy Euler munkásságáról sem volt tudomása. Márpedig úgy tűnik, ez volt a helyzet. Hullámelmélete teljes egészében a saját munkája eredményeként született, amelyet a diffrakció jelenségének legegyszerűbb magyarázataként fejlesztett ki. A döntő bizonyítékot egy olyan kísérlettel szerezte meg, amelyik bizonyos értelemben még a kétréses kísérletnél is egyszerűbb, ám az eredménye még annál is meghökkentőbb.

A diffrakció és az interferencia csíkos mintázatát tulajdonképpen egyetlen rés (vagy egyetlen lyuk) használatával is láthatóvá tehetjük - nincs szükség tehát különlegesen bonyolult berendezésre a trükkhöz. Emeljük a kezünket az arcunk elé, és tartsuk egymáshoz nagyon közel, csaknem összeérintve két ujjunkat. Nézzünk át a két ujjunk közötti résen (a háttér világos legyen), majd közelítsük még jobban egymáshoz az ujjainkat, hogy a rés még keskenyebb legyen. Abban a pillanatban, mielőtt a rés teljesen eltűnne, feltűnik a két ujjunk közötti résben a sötét sávok alkotta mintázat. Általában csak egy vagy két sötét sávot láthatunk, de ha nagyon óvatosan végezzük a kísérletet, többet is észrevehetünk.

A fizikusok ugyanezt a kísérletet végzik el, egyetlen, keskeny rést használva, a fényt pedig egy ernyőre vetítve. A jelenség teljes magyarázata nagyon egyszerű, de némi számítást igényel. A jelenséget az egyetlen rés két szélén fellépő fényelhajlás okozza. A kissé megváltozott irányú fénysugarak különböző útvonalon jutnak a szemünkbe vagy az ernyőre, ezért az útvonalon különböző számú hullám fér el. Fresnel úgy szerezte meg a kulcsfontosságú bizonyítékot a fény

²²Számos munkájának gyakorlati alkalmazására is lehetőség adódott. 1820-ban koncentrikus gyűrűk sorozatából álló, új lencsetípust fejlesztett ki. Ezt a lencsetípust, amely ma is az ő nevét viseli, egyebek mellett a világítótornyokban használták a fény-nyaláb széttartásának csökkentésére.

hullámtermészete mellett, hogy ezt az egyrészes kísérletet „kifordította”. A fénysugár útjába kicsiny akadályt helyezett, ennek szélein fényelhajlás lépett fel, ami az árnyék szélén interferenciát okozott. Kicsit arra hasonlít az egész - természetesen sokkal kisebb méretben -, amikor a hullámok körülnyaldosnak egy vízből kiálló sziklát, és a szikla mögött is megzavarják a vízfelszínt.

A Francia Tudományos Akadémia 1817-ben, a napóleoni háborúk végeztével elhatározta, hogy végérvényesen eldönti a fény természetének kérdését. Erre bizonyára Young munkája adott számukra ösztönzést (valószínűleg Fresnel tevékenységéről még nem volt tudomásuk). Az akadémia díjat ajánlott fel annak, aki a legjobb kísérletet állítja fel a diffrakció tanulmányozására, és azt a jelenség magyarázatát megadó elméleti modellel is alá tudja támasztani. Jóllehet a verseny nyitott volt, arra nem franciák is benevezhettek, mégis mindössze két nevezés érkezett. Az egyik pályázat oly nyilvánvaló képtelenségeket tartalmazott, hogy az akadémia még a beküldő nevét sem tartotta feljegyzésre méltónak, nem is beszélve a beküldött pályamű részleteiről. A másik pályázatot Fresnel adta be, egy 135 oldalas, minden részletre kiterjedő dolgozat formájában. Természetesen Fresnel lett a pályázat győztese, ám munkája nem kis ellenállásba ütközött a bírálók részéről, akik 1819 márciusában ültek össze, hogy meghozzák döntésüket. A pályázat mindhárom bírálója - a matematikus Siméon-Denis Poisson, a fizikus Jean Baptiste Biot és a csillagász-matematikos Pierre Simon Laplace - ugyanis a newtoni elmélet meggyőződéses híve volt.

Fresnel egyáltalán nem volt matematikus, mindamellett a különböző diffrakciós helyzetekben a fény viselkedésének formális, matematikai leírására a Newton és Wilhelm Leibniz által kidolgozott differenciál- és integrálszámítás módszerét használta. Ám az egyenletek helyenként olyan bonyolultak voltak, hogy Fresnel nem tudta őket teljesen megoldani, így bizonyos kísérleti feltételek esetén nem tudta a pontos részleteket kiszámítani. Poisson viszont, amellet, hogy meggyőződéses Newton-hívő volt, vérbeli matematikus is volt. 1781 és 1840 között élt, jelentős eredményeket ért el a valószínűségszámításban, a differenciál- és integrálszámítás területén, az elektromosság és a mágnesesség leírásában, valamint a természettudományok több más ágában. Kiragadta Fresnel egyik példáját, és megoldotta az arra vonatkozó egyenletet, majd az eredményt redactio ad absurdum-ként bemutatta bíráló kollégáinak. Biztos volt abban, hogy ezzel egyszer és mindenkorra sikerül kihúzni a talajt a hullámelmélet lába alól.

Az a nézet, miszerint a színes nyúlványok az árnyék peremén a fényhullámok diffrakciójának következményei lehetnek, legalább valamennyire összhangban áll a hullámok viselkedéséről alkotott hétköznapi felfogásunkkal. Fresnel elmélete és Poisson számításai szerint azonban a fény útjába kicsiny, kerek tárgyat helyezve a fénynek az akadály peremén elhajolva pontosan a test középpontja mögött fényes pontot kellene az ernyőn létrehoznia. Az akadály peremén elhajló fényhullámoknak egyesülniük kell, hogy létrehozzák az árnyék középpontjában ezt a fényes foltot. Képtelenség! Poisson így írta le számításai eredményét:

Essenek párhuzamos fénysugarak egy átlátszatlan korongra, amelynek környezete tökéletesen átlátszó. A korong természetesen árnyékot vet, azonban

az árnyék közepe fényes lesz. Röviden, az átlátszatlan korong közepére emelt merőleges mentén sehol nincs sötétség (kivéve a korong közvetlen közelében). Valójában a fény intenzitása fokozatosan nő a közvetlenül a korong mögött tapasztalható nulla értékről. A korong átmérőjével azonos távolságra a korong mögött a fény intenzitása már eléri a 80 százalékát annak a fényességnek, amit akkor kapnánk, ha a korong egyáltalán nem lenne ott. Ettől kezdve a fényesség lassabban növekszik, de megközelíti a 100 százalékát annak a fényességnek, amit a korong nélkül tapasztalnánk.²³

A bírálóknak természetesen nem állt szándékukban pusztán logikai alapon és a józan észre hivatkozva elvetni Fresnel elméletét. Jó természettudósokhoz méltóan, és a legjobb newtoni hagyományok követőiként, a három bíráló, valamint a verseny tisztaságát felügyelő bizottság elnöke, a fizikus Francois Arago megterveztek egy kísérletet Fresnel előrejelzésének ellenőrzésére. A Fresnel-féle modell alapján számított előrejelzés szerinti fényes pont (amelyet azóta Poisson-foltnak neveznek) éppen ott jelent meg, ahol lennie kellett. A folt kis golyók és korongok esetében egyaránt megjelenik. Fresnelnek igaza volt, Newton tévedett. Erről 1819 márciusában Arago a következőképpen számolt be a Tudományos Akadémia Tanácsának:

„Az Önök által felállított bizottság egyik tagja, Poisson úr, a szerző (Fresnel) által felírt integrálokból azt a rendkívüli eredményt vezette le, miszerint egy átlátszatlan, kör alakú ernyő mögött az árnyék közepének... oly mértékben megvilágítottnak kellene lennie, mintha az ernyő ott sem lenne. Ezt a következtetést közvetlen kísérlet tárgyává tettük, a megfigyelés tökéletesen egybevágott a számítás eredményével.”²⁴

Ez a dolgok lényege. Az elmélet csak akkor érvényes, ha kísérletek támasztják alá, és bármit is mondanak a témába vágó kísérletek, azok eredményeit igaznak kell tekinteni, és azokat bármely jó elméletnek tartalmaznia kell. Nem számít, milyen meghökkentők a kísérletek eredményei - mint például az elektron kettős természetére vonatkozó, a Bevezetőben tárgyalt eredmények - azokat nem szabad a szőnyeg alá söpörni és kihagyni az elméletekből.

Természetesen a díjat odaítélő bizottság támogatásának köszönhetően immár biztosítva volt Fresnel hírneve. Aragóval együtt a transzverzális hullámelmélet egyes kérdéseivel foglalkoztak, sikerült megmagyarázniuk a polarizált fényvel kapcsolatos, régóta megoldatlan rejtélyeket, ami jelentős lépés volt azon felismerés irányába, hogy a fény valóban transzverzális hullámokból áll. Fresnel kigondolt egy kísérletet a fény vízbeli terjedési sebességének mérésére. A kísérletet 1850-ben végezték el, az eredmények azt bizonyították, amit az elmélet megjósolt, nevezetesen, a fény lassabban terjed a vízben, mint a levegőben - addigra azonban már senkit sem kellett meggyőzni arról, hogy a fény valóban hullámként terjed. Fresnel 1823-ban a Francia Tudományos Akadémia tagjává választották, majd 1827-ben, röviddel azelőtt, hogy tuberkulózisban meghalt, és

23 Idézi Baierlein: Newton to Einstein, 102. oldal.

24 Baierlein: Newton to Einstein, 103. oldal, dőlt betűs kiemelések Gribbintől.

éppen száz évvel Newton halála után, a Royal Societynek is tagja lett. Fresnel mindössze 39 éves volt, amikor meghalt, Young túlélte őt, és 1829-ben, egy hónappal 56. születésnapja előtt halt meg. Két évvel később a skóciai Edinburghban megszületett az az ember, aki végérvényesen magyarázatot adott a fényhullámok működésére. Ám James Clerk Maxwell magyarázata a fény természetére az elektromosság és a mágnesség közötti kölcsönhatás egy korábbi elméletére épült. Ez utóbbi elmélet még az 1820-as években született, amikor még Young is, és Fresnel is élt.

A könyvkötőinas

Az 1791-ben született Michael Faraday a XIX. század legnagyobb kísérletező tudósa lett, miután kitartással, tehetségével és némi szerencsével legyőzte az egyszerű családi háttérből és a formális iskolai oktatás hiányából adódó hátrányát. A surreybeli Newingtonban egy szegény kovácsmester négy gyermeke közül harmadikként látta meg a napvilágot. Abban az időben ez a falu még vidéknek számított, még nem olvasztotta magába a terjeszkedő London, ma ez a terület kouthwark kerület része. A család később London északi részére költözött, Faraday pedig 13 éves korában kifutó fiú lett egy könyvárus könyvkötőnél. Az elemi iskolában ugyan olvasni legalább megtanult, de matematikából szinte semmilyen előképzettsége nem volt, a munkahelyén, könyvekkel körülvéve azonban csillapíthatatlan étvággyal vetette rá magát a könyvekre, hogy tudásbeli hiányosságait pótolja. Munkaadója, egy francia bevándorló, aki a forradalom zűrzavara elől menekült a Csatorna túlsó partjára, biztatta a tanulásra, sőt maga mellé vette könyvkötőinasnak. A következő hét év alatt Faraday kitanulta a szakmát, és jó kézügyességre tett szert, aminek későbbi pályafutása során, kísérleti fizikusként igen jó hasznát vette. Mindent elolvasott ami csak a keze ügyébe került, különösen nagy hatással volt rá az Encyclopaedia Britannica elektromosságról szóló cikke.

1810-ben, 19 éves korában a Városi Filozófus Társaság tagja lett, és rendszeresen részt vett a csoport által szervezett, különböző tudományos témákkal foglalkozó előadásokon. Megtanulta a fizika és a kémia alapjait, és ő maga is részt vett a kísérletezésben. Részletes és pontos jegyzeteket készített az előadásokról, amelyeket azután saját maga számára könyv formájában be is kötött. Ezek a könyvek jelentették számára a sikerhez vezető útra szóló útlevelet.

Faraday munkaadója, M. Ribeau büszkén mutogatta a köteteket az üzletében megforduló vevőknek. Egyikükre különösen nagy hatással volt Faraday tudomány iránti lelkesedése, ezért elintézte, hogy a könyvkötőinas részt vehessen a Sir Humphry Davy által a Royal Institution-ban tartott előadásokon. Davy ragyogó előadó volt, egyben kora leghíresebb tudósa egész Angliában. 1778-ban született, és egyebek között ő vezette be a nitrogén-oxid (a kéjgáz) használatát orvosi altatószerként. Legjelentősebb gyakorlati találmánya a biztonsági lámpa volt, amely minimálisra csökkentette a gázrobbanás veszélyét a szénbányák mélyén. A Davy-lámpa attól kezdve a szénbányák alapfelszereltségéhez tartozott.

Faraday, akire addigra már mély benyomást tett a természettudomány, Davy előadásaitól még jobban fellelkesült. Éppen a végére ért tanoncéveinek (1812-ben), ezért elhatározta, hogy inkább a tudományban próbál szerencsét, nem pedig könyvkötőként. Davy előadásairól is jegyzeteket készített, és ezeket is egybekötötte, miközben - teljesen sikertelenül - valamiféle állást keresett magának, ami a tudománnyal állt volna kapcsolatban. Egyetlen potenciális munkaadó sern vette azonban komolyan reménybeli tudósként az állástalan könyvkötőt. Egyetlen lehetőség kínálkozott csupán, de eleinte az sem kecsegtetett semmiféle tartós megoldás lehetőségével. Amikor ugyanis Davy egy időre elveszítette látását a laboratóriumában történt robbanás következtében, akkor néhány napig Faraday volt a segítője. Ezt követően elküldte neki saját jegyzeteit, amelyeket Davy előadásán készített, és a kísérőlevélben állandó állást kért a maga számára. Bár Davynek nagy gyönyörűséget okozott az előadásai alapján készült gondos munka, ez nem volt elég - a Royal Institutionban ugyanis egyszerűen nem volt üres állás.

Ekkor azonban a pártjára állt a szerencse. Davy asszisztense verekezésbe keveredett, ezért kirúgták az állásából. A munkát Faraday-nek ajánlották fel, aki 21 éves korában, 1813. március 1-jén kezdett a Royal Institutionban dolgozni. Davy több szempontból sem volt ideális munkaadó. Sznob volt, amellet féltékeny volt más tudósok munkájára, lekicsinyelte mások eredményeit és könnyen indulatba hozható természetű ember hírében állt. Faraday munkaköre az első három évben abból állt, hogy Davyt inasaként elkísérte hosszabb európai utazásaira. Noha a munka nemcsak alantas volt, hanem rosszul is fizették (heti egy guinea - kevesebb, mint amit könyvkötőként keresett - és szállás a Royal Institution két padlásszobájában), azonban Faraday találkozhatott a kor neves tudósaival, és láthatta őket munka közben. Tudományos cikkeket kezdett írogatni (1816-tól kezdve), ő volt az első, aki (1823-ban) gázokat (köztük klórt) tudott cseppfolyósítani. 1824-ben a Royal Society tagjává választották (bár Davy, aki akkor a társaság elnöke volt, ellenezte a felvételét). 1825-ben felfedezte, és köolajból előállította a benzolt. Ugyanebben az évben kinevezték a Royal Institution laboratóriuma igazgatójává, majd egy évvel később péntek esténként megkezdhetette saját, önálló előadássorozatát az intézetben. Hírneve és sikerei kezdtek túlnőni Davyén, aki keserűen vette tudomásul, hogy pártfogoltja eredményei még az ő munkáját is elhomályosítják. Davy azonban 1829-ben fiatalon elhunyt, és attól kezdve egészen 1861-ig Faraday és a Royal Institution lényegében egyet jelentett. 1861-ben visszavonult Hampton Court-i házába, amelyet Albert herceg 1858-ban adományozott neki. 1867-ben, egy hónappal a 77. születésnapja előtt halt meg. Sajátos rekordot mondhat magáénak azért, hogy nemcsak a lovagi címet utasította vissza, hanem (két alkalommal is) a Royal Society elnökévé történő megválasztását is elhárította. „Mindig úgy éreztem”, mondta, „hogy van valami lealacsonyító abban, amikor szellemi teljesítményért kitüntetések ajánlanak fel, ami attól még lealacsonyító marad, hogy társaságok és akadémiák, sőt királyok és császárok beleavatkoznak ezekbe a dolgokba.”

Hosszú pályafutása során a számos különböző területen elért eredményei ellenére Faraday legjelentősebb hozzájárulását a tudomány fejlődéséhez az elektromosság és a mágnesség természetét tisztázó kutatásai jelentették. Ez nemcsak a

fényterjedés megértését készítette elő, hanem eközben bevezetett egy olyan fogalmat a fizikába, amely azóta is kulcsfontosságú a Világegyetem működésének megértésében, nevezetesen az erőter fogalmát.

Faraday erőterei

Faraday már 1821-ben elvégezte első, jelentős vizsgálatait az elektromosság és a mágnesség területén. Az előző évben Hans Oersted Koppenhágában meglepő felfedezésről számolt be: a huzalban folyó elektromos áram hatására a közelébe helyezett kis iránytű mágnesűje elfordult. Nyilvánvalóan a vezetékben folyó áram mágneses hatást fejtett ki. André Ampere, akinek a nevét az elektromos áramerősség mértékegysége tette halhatatlanná, kimutatta, hogy két, egymással párhuzamos vezető vonzza egymást, ha azonos irányú elektromos áram folyik bennük, ezzel szemben ellentétes irányú áram hatására taszítóerő ébred közöttük. Francois Arago, akiről korábban már volt szó, megállapította, hogy a forgó rézkorong mellé helyezett iránytű ugyancsak eltérül.

A Philosophical Magaziné szerkesztője arra kérte Faradayt, hogy vizsgálja meg ezeket a titokzatos jelenségeket, és magyarázza el azokat a lap olvasóinak. Faraday elvégezte a kísérleteket, és arra a következtetésre jutott, hogy az elektromos áramot szállító vezeték körül „mágneses erővonalak” csavarodnak fel. Megtervezett és megépített egy olyan rendszert, amelyikben egy felfüggesztett vezeték körbe tudott járni egy állandó mágneset, illetve amelyikben egy felfüggesztett mágnes körben mozgott egy rögzített helyzetű, egyenes vezető körül, mindkettő a mágneses tér hatására. Ez a kísérlet lényegében a villanymotor és (végső soron) a dinamó vagy az elektromos generátor működési elvét szemlélteti. Ha az elektromos áram mágneses teret képes létrehozni, érvelt Faraday, akkor a mágnességnek is képesnek kell lennie áramot keltenie.

Ezt 1831-ben sikerült bebizonyítania. Az általa felfedezett „elektromágneses indukció” legnyilvánvalóbb esete, amikor egy közönséges rúd-mágneset betolunk egy elektromos vezetőből készített tekercsbe, vagy kihúzzuk onnan. Amíg a mágnes mozog, a huzalban elektromos áram folyik. Faraday mindkét állítást bebizonyította, azt is, hogy a mozgó elektromosság mágneses teret kelt, és azt is, hogy a mozgó mágnes elektromosságot hoz létre. Az állításokban a mozgó szó a legfontosabb, a második hatás felfedezése azért váratott olyan sokat magára, mert Faraday arra számított, hogy az állandó mágneses tér is elektromos áramot tud kelteni a közelében elhelyezett vezetékben.²⁵

²⁵Faraday elképzelései hamarosan a modern természettudomány szerves részévé váltak. Ezt jól jelzi az a tény, hogy ma már szinte lehetetlen ezekről a jelenségekről az „erőter” csak sokkal később bevezetett fogalma nélkül beszélni. Ma már „mindenki ismeri” az erőtereket, az erővonalakat, ezek éppúgy a közgondolkodás részei, mint ahogy az egykori generációk számára az éter is az volt.

Most már meg tudta magyarázni Arago korongjának a rejtélyét - a réz vezető mozgása a mágnes hatása alatt indukált áramot keltett a korongban, az indukált áram viszont mágneses teret hozott létre, ami eltérítette a mágnest. Ez volt az egyik első példa a visszacsatolás néven ismert folyamatra. A téma variációjaként Faraday egyik elrendezésében a rézkorong egy nagy mágnes pólusai között forgott, miközben két vezeték súrlódott a felületéhez, egy a közepén, egy pedig a peremén. Ezzel Faraday 1831 októberében megépítette az első elektromos generátort.

Faraday sokat törte a fejét a jelenségek magyarázatán. Nem volt jártas a matematikában, viszont ösztönös tehetsége volt a képi gondolkodáshoz. Ezért azzal a forradalmi gondolattal állt elő, hogy az éternek vagy plumnak nevezett, a Világegyetemet kitöltő, és a különböző hatásokat mechanikai úton, apró testecskék fizikai kölcsönhatása, lökdösődése révén továbbító anyag helyett az elektromos és a mágneses erők, sőt még a gravitáció is az „erővonalak” fogalmával írhatók le. Az erővonalak az üres térben haladnak és kölcsönhatásban állnak egymással. Az atomokat nem parányi, szilárd és áthatolhatatlan anyagcsomóknak tekintette, hanem olyan központoknak, ahol az erővonalak koncentrálnak - nem többnek, de nem is kevesebbek.

Az erővonalak fogalma jól ismert bárki számára, aki elvégezte, vagy legalább megnézte azt az iskolai kísérletet, ahol vasreszeléket szórnak egy papírlapra, majd egy rúd mágneset tartanak a papír alá. A vaspor szemcséi a mágnes két pólusa közötti ívesen haladó vonalak mentén rendeződnek. Ez valóban látványosan új ötlet volt a viktoriánus Angliában, különösen, amikor a természetben minden ismert erőre alkalmazni lehetett. Faraday sokat tépelődött, mielőtt ezeket a felismeréseit a Royal Institutionban tartott két előadásában nyilvánosságra hozta 1844-ben, illetve 1846-ban. A második előadás nyilvánvalóan csak rögtönzés volt - aznap Charles Wheatstone-nak kellett volna előadást tartania, de hirtelen lámpalázás roham lett úrrá rajta, és az utolsó pillanatban elrohant, így Faradaynek nem maradt más választása, neki magának kellett a helyére állnia. Miután összefoglalta, miről kellett volna Wheatstone-nak beszélnie, rögtönzött, és ismertette elképzeléseit az erővonalakról.

Klasszikus „gondolatkísérletében” Faraday arra kérte hallhatóságát, képzeljék el, hogy a Nap egyedül áll a térben. Mi történne, ha valamilyen varázslat folytán a Föld egyik pillanatról a másikra megjelenne a Naptól megfelelő távolságban? Honnan „tudná” a Föld, hogy ott van a Nap? Faraday érvelése szerint a Nap hatására a gravitációs tér erővonal formájában már előbb szétterjed a térben, még mielőtt a Föld odaér. A Föld válasza a Nap gravitációs terére nem más, mint a válasza hogy a Föld tartózkodási helyén jelen vannak a Nap erőterének vonalai, nem pedig a Nap távoli jelenlétére. Ami a Földet illeti, az erővonalak (az erőter) valóságosak. Faraday érvelése szerint az elektromos és a mágneses erővonalak hasonló módon behálózják a Világegyetemet. Csak ezek az erőterek (ahogyan ma nevezzük őket) a valóságosak, maga az anyag - az atomok - pedig csupán azok a helyek, ahol az erővonalak összesűrűsödnek.

1846-ban tartott előadásában Faraday még tovább ment. Kijelentette hogy a fény

az elektromos erőter erővonalainak rezgésével magyarázható. Végülis addigra már közismert ténynek számított, hogy a fény hullám - vagyis rezgés. Faradaynek hiányoztak a szükséges matematikai ismeretei annak teljes körű kifejtéséhez, miként halad a fény, ám a fizikai kép világos volt a számára, amit így fogalmazott meg, amikor az 1846-os előadásában elhangzott nézeteit néhány évvel később írásban is megjelentette: „Az elképzelés, amelyet bátorkodom bemutatni, a sugárzást azon erővonalak szapora rezgéseinek tekinti, amely erővonalak tudomásunk szerint összekötik egymással a részecskéket és az anyagtömegeket. Arra törekszünk, hogy tárgyalásunkból kiiktassuk az étert, de megtartsuk a rezgéseket.”²⁶

Néhány évvel később John Tyndall, egy másik, XIX. századi tudós, szemet gyönyörködtető könyvében grafikusan is bemutatta, milyen óriási számú rezgés van jelen a fényben. Tyndall rámutatott, hogy a fény roppant sebessége következtében másodpercenként egy 300 000 km hosszú „fényoszlop” lép be a szemünkbe. A fény hullámhossza például a vörös fény esetében olyan kicsi, hogy kerekítve mintegy 400 milliárd vörös fényhullám fér el egy ilyen hosszú oszlopban, amelyek mindegyike kölcsönhatásba lép a szemünkben elhelyezkedő receptorokkal, és fényérzetet vált ki.²⁷

Faraday elképzeléseit a hullámok természetéről a következő két évtizedben Maxwell munkássága igazolta. Maxwell végső soron az elektromos és mágneses terek rezgéseit négy egyenletben foglalta össze amelyeket 1864-ben, három évvel Faraday halála előtt publikált.

A varázslat színei

Maxwell indíttatása merőben eltért Faradayétól. Ő volt a Newton és Einstein közötti korszak legjelentősebb fizikusa. Előkelő, XVIII. századi skót családból a penicuiki Clerkek közül származott. A XVIII. században két házassági kapcsolat is létrejött a Clerkek és egy másik, hasonlóan előkelő skót család, a middelbie-i Maxwellek között. James apja, John Clerk felvette a Maxwell nevet, amikor a middelbie-i birtokot örökölte, amely birtok 600 hektár művelhető földet jelentett Délnyugat-Skóciában, a gallowaybeli Dalbeattie közelében. John Clerk Maxwell ügyvéd volt, ám élénken érdeklődött a természettudományok iránt, olyannyira, hogy az Edinburgh-i Royal Society tagjává is választották. James tehát a biztos családi háttér mellett hamar megismerkedhetett a tudományos világgal is.

1831-ben Edinburgh-ban született, mert szülei abban az időben ott tartózkodtak, hogy édesanyjának a szülés idején a legmagasabb színvonalú orvosi ellátásban lehessen része. Élete első tíz évét azonban a gallowayi birtokon épült Glenair House-ban töltötte. Egyedüli gyermek volt, akit édesanyja tanított meg olvasni,

26 Michael Faraday: Experimental Researches in Electricity, 11. kötet (London, Taylors, 1855), 451. oldal.

27 Tyndall: On Light, 63. oldal; a számokat ma használatos formára alakítottam.

sőt az első években ő felügyelt a tanulmányaira is. Amikor azonban a fiú 8 éves volt, 48 éves édesanyja rákban meghalt. Abban az időben Dalbeattie egy isten háta mögötti településnek számított. A várost csak 1846-ban érte el a vasút, korábban Glasgow-t csak egy nap utazással lehetett elérni. A Glasgow-Edinburgh vasútvonal 1837-es megnyitása előtt Edinburgh kétnapi járásra feküdt. A környéken nem éltek Maxwellhez hasonló korú gyerekek. Az édesanyja halála miatti traumát csak fokozta, hogy a következő két évben egy házitanító gyötörte, akinek határozottan idejétmúlt felfogása volt az oktatásról és a latin nyelv bemagolásának fontosságáról. Ezután Jamest az Edinburgh-i Akadémiára írták be. A tanév közben, a városban egyik nagynénjénél lakott, csak a vakációk idejére tért vissza Glenairbe. A gallowayi fiú első ránézésre nem tűnt zseninek osztálytársai szemében. Falusi tájszólással beszélt, és a városi fiúktól eltérően öltözködött. Cipőit apja kizárólag praktikus szempontok figyelembevételével tervezte és készítette. Amikor az iskolában töltött első napja után Maxwell horzsolásokkal és zúzódásokkal a testén, elszakadt ruhájában hazament nagynénje házába, már gúnyneve is volt: „Bunkó”. Ez a név az akadémián töltött évei alatt mindvégig rajta maradt, ám ez inkább szokatlan külsejére, nem pedig szellemi képességeinek hiányára vonatkozott.

A baljóslatú kezdetek ellenére Maxwell megállta a helyét az iskolában. Néhány éven belül megmutatkozott kiemelkedő matematikai tehetsége. Rájött, hogyan lehet egy fonálból kötött hurok segítségével tökéletes oválist (nem ellipszist) rajzolni. Apja bejáratos volt az edinburgh-i tudományos körökbe, így összeköttetéseinek köszönhetően James publikálhatta felfedezését - ez volt élete első tudományos cikke, 14 éves korában. Őszintén szólva, az ötlet nem minősíthető világrengető felfedezésnek - mindamellett ezáltal elérte, hogy nagyon ifjú kora ellenére bejutott Edinburgh tudományos közösségébe.

1847-ben, 16 éves korában (amikor a skót fiatalok általában megkezdtek egyetemi tanulmányaikat) Maxwell az Edinburgh-i Egyetemre iratkozott be. Miután az előírt négy évből hármat elvégzett, átment Cambridge-be, ahol 1854-ben matematikusi diplomát szerzett. 1856-ban Aberdeenben a Marischal College természetfilozófia professzora lett, ám amikor 1860-ban a Marischal College-ot összevonták az aberdeeni King's College-dzsal, az összevont intézetben csak egy természetfilozófia professzorra volt szükség, és Maxwellnek mennie kellett, mert ő volt a fiatalabb. Elvesztette tehát az állását, annak ellenére hogy addigra már feleségül vette a kollégium igazgatójának a lányát. Öt évre a londoni King's College-ba szerződött, amikor azonban meghalt az apja, visszatért a családi birtokra. Hat évig maradt, mint földbirtokos és amatőr természettudós (miközben kihasználta a lehetőséget és az elektromossággal és mágnességgel kapcsolatos nagy művét könyv formájában is megírta). 1871-ben azonban rábeszélték, hogy térjen vissza Cambridge-be, ahol a kísérleti fizika professzora és a Cavendish Laboratórium első vezetője lett. Az volt a szándéka, hogy a laboratóriumot a világ egyik vezető tudományos kutatóközpontjává fejleszti. 1879-ben azonban meghalt - halálát ugyanaz a betegség (a rák) és pontosan ugyanazon életkorában (48 éves korában) okozta, mint édesanyja halálát.

Maxwell érdeklődése a XIX. századi fizika számos területére kiterjedt. Foglalkozott többek közt a gázok kinetikus elméletével, a hővel és a termodinamikával, a Szaturnusz gyűrűinek természetével és stabilitásával, pontos becslést adott a molekulák méretére. Mindamellet legjelentősebb fejlődést elindító munkássága a fény és a színek természetére vonatkozott. Első, valóban drámai jelentőségű felfedezése sokkal inkább varázslatnak tűnik, mintsem tudománynak. Rájött, hogyan lehet fekete-fehér fényképekből színes képet előállítani - az eljárást mind a mai napig használják, ezzel a módszerrel küldenek az űrszondák színes képeket a Földre a Naprendszer távoli vidékeiről, például a Szaturnuszról. Amikor egy űrszonda a Földre küldi a Szaturnusz gyűrűjéről készült képet, akkor Maxwell három alapszínen alapuló színes fényképezési technikáját használja a Maxwell által értelmezett gyűrűrendszer színes képének előállítására. A felvételeket rádióhullámok segítségével továbbítják, amelyek tulajdonságait ugyancsak Maxwell magyarázta meg (valójában a rádióhullámok esetében csak megjósolta a létezésüket). Valóban bámulatos!

A színes fényképezést Maxwell Young ötlete alapján találta fel. Young ugyanis kimutatta, hogy az emberi színlátás alapja a szemben található három különböző típusú receptor, amelyek mindegyike más alapszínre, a vörösre, a zöldre és a kékre érzékeny (egyebek között Young elmélete helyes magyarázatot adott a színvakoságra is, amit a három közül egy vagy két receptortípus hibájaként értelmezett). Maxwell 1849-ben James Forbes laboratóriumában kezdte a különböző színek kölcsönhatását tanulmányozni, amikor még az Edinburgh-i Egyetem hallgatója volt. Forbes már régebből ismerte Maxwellt, még mielőtt a fiatalember beiratkozott volna az egyetemre, Forbes volt ugyanis a természetfilozófia professzora, akinél Maxwell apja közbenjárt, hogy fia cikke az oválisok szerkesztéséről megjelenhessen a Proceedings of the Royal Society of Edinburgh-ban. Forbes és Maxwell a vizsgálataikhoz forgó, színes korongokat használtak. A korongot cikkelyekre osztották, mindegyiket más színűre festették, majd megforgatták, és megfigyelték, milyennek érzékeli a szem a keverék színt.

Forbes súlyos betegsége miatt kénytelen volt abbahagyni a kísérleteket, Maxwell pedig nemsokára otthagyta Edinburgh-t. Miután azonban Cambridge-ben megszerezte a diplomáját, folytatta a kísérleteket. Kimutatta, miként állíthatók elő a különböző színek a három alapszín keverésével, és feltalálta a „színek dobozának” nevezett eszközt, amelyben a nap fényéből először elkülönítette a három alapszínt, majd ezek megfelelő arányú keverésével tetszés szerinti színt létre tudott hozni.

Maxwell e területen végzett munkájának a megkoronázását az jelentette, amikor 1861-ben a Royal Institution lenyűgözött hallgatósága (köztük Faraday) szeme láttára kivetítette az első színes fényképet. Ez a kép volt minden későbbi színes fénykép előfutára, de ugyanezt az elvet használják a színes tévékészülékben is. Maxwell három különböző felvételt készített egy darab skótkockás szövetről, az egyiket vörös, a másikat kék, a harmadikat zöld színszűrőn keresztül. Minden egyes szűrő csak egyetlen színt engedett át. Ezért minden egyes fotólemez csak a rá jellemző színnek megfelelő fény-árnyék mintázatra vonatkozó információt rögzítette. Ám mindhárom fénykép egyszerû fekete-fehér felvétel volt. Három,

különböző fekete-fehér képe volt tehát, ugyanarról a szövetdarabról, amelyek mindegyike másutt volt világos és másutt sötét, de egyikén sem volt a leghalványabb nyoma sem a színeknek.

Ezután a három fotólemezen rögzített képet egyidejűleg ugyanarra az ernyőre vetítette, gondosan ügyelve arra, hogy a három kép tökéletesen fedésben legyen egymással. Természetesen mindhárom képet a neki megfelelő színszűrőn keresztül vetítette ki. A felvételeket egyenként is levetíthette, külön-külön megmutatva a vörös, a kék és a zöld képet. Ezzel bebizonyította, hogy a kombinált kép a vetítőernyőn valóban csak a vörös, a kék és a zöld összetevőket tartalmazta, ám pontosan olyan arányban, ahogyan azok az eredeti szövetről visszaverődtek. Az egyesített kép ugyanazokat a színeket mutatta, mint az eredeti skótkockás szövet, ami egyúttal azt is bizonyította, hogy az emberi színérzékelés is csak a három alapszín használja.

A távoli világokat kutató űrszondák ugyanezt a jelenséget használják; azok is három különböző színszűrőn keresztül készítenek egy-egy képet, amelyeket (a képpontok által kirajzolt sötét-világos mintázatot) rádióhullámok segítségével a Földre küldenek. Itt azután a három képből számítógéppel állítják elő az egyesített, színes képet. Hasonló trükk alapján működik a színes tévékészülékünk is, mert a képernyőt háromféle színű, apró pontok sokasága borítja. Megfelelő gerjesztés hatására minden egyes képpont valamelyik alapszín egyikében kezd világítani. A színes kép előállításához a három alapszín pontjait a megfelelő kombinációban kell világításra gerjeszteni.

Bár Maxwell bemutatója a Royal Institutionban sikeres volt, valójában több volt benne a varázslat, mint amire akkor Maxwell egyáltalán gondolt. Az esemény szemtanúiban ugyan szemernyi kétség sem maradt afelől, hogy valóban színes képet látnak a vetítőernyőn, évekkel később a fényképészek rájöttek, hogy a bemutatón használt fotólemezek olyan kémiai anyagot tartalmaztak, amelyik egyáltalán nem is lehetett volna érzékeny a vörös színre. A rejtélyt csak az 1960-as évek elején, az Egyesült Államokban, a Kodak laboratóriumában sikerült megoldani. Megállapították, hogy a Maxwell által lefényképezett szövetdarab olyan vörös festéket tartalmazott, amelyik az (emberi szem számára láthatatlan) ibolyántúli fényt is visszaverte, és ugyancsak merő véletlenségből az általa használt vörös színszűrő az ibolyántúli sugarakat is átengedte. A fény és árnyék „vörös” képen előálló mintázata Maxwell bemutatójában tehát tulajdonképpen az ibolyántúli fényben készült képet ábrázolta, ám a kétszeres véletlen egybeesésnek köszönhetően ez pontosan ugyanaz a mintázat volt, amit akkor kapott volna, ha a fényképezőlemez érzékeny lett volna a vörös fényre.

A Maxwell által használt eredeti fényképezőlemezeket Cambridge-ben megőrizték, és segítségükkel 1961-ben, az eredeti kísérlet századik évfordulóján rekonstruálták Maxwell bemutatóját. A három fényképezőlemez változatlanul visszaadta a szövetdarab élethű, színes képét, bár addigra minden résztvevő számára nyilvánvaló volt, hogy a kép „vörös” összetevője csak a véletlenek szerencsés összejátszásának köszönhetően látható. Ebben az esetben tehát Maxwell nemcsak azért tűnt varázslónak, mert három fekete-fehér felvételtől

élethû, színes képet állított elő, hanem azért, mert (részben) hibás feltételekből kiindulva mégiscsak helyes eredményt kapott. Legnagyobb tudományos eredményénél azonban a helyes választ helyes érveléssel kapta meg - ám ezzel a helyes válasszal bőségesen ellátta megoldandó problémákkal a fizikusok következő generációt.

Maxwell bámulatos egyenletei

Az elektromosság és a mágnesség területén jelentős eredményeket hozó munkásságát Maxwell már akkor megkezdte, amikor 1854-ben elvégezte a Cambridge-i Egyetemet. Az előző évtizedben az 1824 és 1907 között élt William Thomson, aki 1892-ben Kelvin lordja lett, matematikai analógiát állapított meg a szilárd testekben folyó hőáramlás és az elektromos erők egy adott tartományon belüli eloszlása között. Ez felkeltette Maxwell érdeklődését, ezért megpróbált más, hasonló analógiákat keresni, amiről levelezés útján élénk eszmecserét kezdett Thomsonnal. Az elektromosság és mágnesség témakörében publikált első dolgozata az 1850-es évek közepén analógiát mutatott ki a Faraday-féle erővonalak és az összenyomhatatlan folyadékok „áramlási vonalai” között.

Abból a tényből azonban, hogy az elektromosság hasonló egyenletekkel írható le, mint tőle fizikailag teljesen eltérő jelenségek, például a hő áramlása szilárd testekben vagy a folyadékok áramlása, semmiképpen sem szabad arra következtetni, vélte Maxwell, hogy az elektromosság az említett két jelenség bármelyikéhez is „hasonló” lenne - az analógia csupán matematikai természetű, „a kapcsolatok hasonlósága, nem pedig a velük kapcsolatban álló dolgok hasonlósága”. Bár ugyanolyan típusú egyenletek írják le a hő, a víz és az elektromosság mozgását, ez nem jelenti azt, hogy az elektromosság azonos lenne a vízzel, vagy a víz a hővel.

Az elkövetkező tíz év során Maxwell kiterjesztette az elektromosság és a folyadékáramlás közötti analógiát. Kidolgozta az elektromos és mágneses erőknek azt a ma már bizarnak tűnő képét, amely szerint ezeket az erőket az anyagi objektumok közötti teret kitöltő folyadék - az éter - örvényei közötti kölcsönhatások közvetítik. Bizonyos értelemben ez visszalépést jelentett Faraday felfogásához képest, amely szerint nincs szükség éterre, mert csak maguk az erők - illetve az erőterek - számítanak. A Maxwell által azokban az években használt fizikai kép azonban nem volt olyan lényeges, mint azok az egyenletek, amelyeket levezetett. Ugyanazzal a matematikai formalizmussal lehetett leírni a különböző fizikai rendszereket, amint arra a víz és a hő áramlása közötti hasonlóság is következtetni engedett. Márpedig a Maxwell-egyenletek, bármilyen fizikai képet társított is hozzájuk, mégiscsak pontosan leírták az elektromos töltést hordozó és a mágneses testek között fellépő erőhatásokat - feltéve, hogy az örvénylő közeg (az éter) tulajdonságait megfelelően választotta meg.

A következő lépésként végiggondolta, mi történne, ha az örvénylő közeget összenyomnánk vagy széthúznánk - feltéve, hogy egyáltalán rugalmas

tulajdonságú. A hullámok nyilvánvalóan képesek ebben a közegben haladni. A hullámok terjedési sebessége a közeg tulajdonságaitól függ, és 1862-ben Maxwell megállapította, hogyha a közeg tulajdonságait az elektromos és mágneses erők magyarázata által megkövetelt módon választjuk meg, akkor a közeg éppen fénysebességgel továbbítaná a hullámokat. Izgatottsága kiviláglik abban az évben publikált cikkének minden szavából, amelyben a dőlt betűs kiemelések magától Maxwelltől származnak: „Aligha kerülhetjük el azt a következtetést, miszerint a fény annak a közegnek a transzverzális rezgéseiből áll, amely közeg az elektromos és mágneses jelenségeket létrehozza.”²⁸

Sok munka volt azonban még hátra az elektromágneses jelenségek és a fény matematikai leírásának tökéletesítésében. Maxwell rájött, hogy teljes egészében el lehet vetni az örvényelméletet, mert minden ismert elektromos és mágneses jelenséget le lehet írni az elektromágneses tér dinamikus elméletével, amint azt 1864-ben megjelent cikkének már a címében is jelezte (A Dynamical Theory of the Electro-magnetic Field). Az elmélet mindent, ami az elektromosságról és a mágnességről elmondható volt, négy egyenletben foglalt össze. Ezt a négy egyenletet ismerjük ma Maxwell-egyenletekként. Ha ki akarjuk számítani két, meghatározott elektromos töltésű, egymástól adott távolságban elhelyezkedő test között ható erőt, akkor az eredményt a Maxwell-egyenletek megoldásával kaphatjuk meg. Ha ki akarjuk számítani, milyen erősségű áramot kelt mozgásával egy adott mágnes, akkor ugyancsak a Maxwell-egyenleteket kell megoldanunk. Minden, az elektromossággal és mágnességgel kapcsolatos probléma (néhány, a következő fejezetben tárgyalandó kvantummechanikai probléma kivételével) megoldható Maxwell egyenletei segítségével. Maxwell eredménye kétségtelenül a fizika legjelentősebb vívmánya volt Newton óta. Ráadásul Maxwell egyenleteiben szerepel egy bizonyos, c -vel jelölt állandó, amely az elektromágneses hullámok terjedési sebességének felel meg.

A nyugvó vagy vezetőekben mozgó töltések tulajdonságainak mérését célzó kísérletekkel meghatározható a c állandó értéke. Ez a szám kizárólag az elektromosság és a mágnesség kutatása során bukkan fel. Amint maga Maxwell megjegyezte, korábban a kísérleteinkben „csak arra használtuk a fényt, ... hogy lássuk a műszereket”. A kísérletek eredményeként (c értékére) kapott szám viszont pontosan megegyezett a fény sebességével.

Ez a sebesség oly közel esik a fénysebességhez, hogy jó okunk van feltételezni, hogy maga a fény (a sugárzó hővel és más sugárzásokkal együtt, ha ilyenek egyáltalán léteznek) olyan elektromágneses zavar, amelyik az elektromágneses térben, az elektromágnesség törvényeinek megfelelően terjed.²⁹

Maxwell rájött, hogy a látható fényen kívül más elektromágneses sugárzások is létezhetnek - a ma infravörös sugárzásként ismert hő, továbbá „más sugárzások”,

28 Az On Physical Lines of Force című cikkből idézi Everitt: James Clerk Maxwell, 99. oldal.

29 Mindkét idézet Maxwell 1864-es cikkéből származik, idézi Baierlein: Newton to Einstein, 122. oldal.

többek közt az akkor még nem ismert rádióhullámok. Az elektromágneses sugárzás más fajtainak létezésére vonatkozó jóslatát az 1880-as években sikerült igazolni, amikor Heinrich Hertz függőleges huzalokban fel-le mozgatott elektromos töltések segítségével hosszú hullámhosszú elektromágneses hullámokat keltett, és megmérte azok sebességét. Ezek a rádióhullámok valóban fénysebességgel terjedtek, amint azt Maxwell megjósolta, ezenkívül megfelelő kísérleti berendezéssel kimutatható volt a törésük, visszaverődésük és diffrakciójuk.

Maxwell egyenleteinek modern értelmezéséből már eltűntek az örvények és az éter. Faraday erővonalai, vagyis az elektromágneses tér lépett a helyükre. Természetesen mindez csupán a legutolsó lépés abban az irányban, hogy képet alkothassunk a valóságról; mindamellett nekünk sincs jobb elképzelésünk arra vonatkozóan, milyen lehet egy „valódi” elektron, mint Faradaynek, Maxwellnek vagy bárki másnak. A térelmélet előnye az egyszerűségében rejlik, továbbá abban, hogy tisztán és világosan megmutatja, miként működik a matematika. A modelleket azonban soha nem szabad többre tartani, mint pusztán gondolkodásunk segédeszközének, azaz olyan módszernek, ami segít elképzelni (vagy kiszámítani), milyen folyamatok játszódhatnak le. A valóság magukban a matematikai egyenletekben lakozik, függetlenül attól, hogy az egyenleteket éppen az elektromágneses hullámok, a szilárd testben áramló hő vagy a víz áramlásának leírására használjuk. Ha az egyenletek helyesen írják le, miként változik meg a rendszer egy bizonyos zavar hatására, akkor nem különösebben érdekes, miként képzeljük magunk elé a jelenségben szereplő erők kölcsönhatását.

A legtöbb embernek továbbra is szüksége van az analógiákra és a modellekre annak elképzeléséhez, hogyan játszódhatnak le bizonyos folyamatok. A fény terjedésének legegyszerűbb gondolati képe, ha egy kötél mentén terjedő hullámokra gondolunk. Emlékezzünk vissza arra, hogy a mozgó mágneses tér elektromos teret hoz létre, a változó elektromos tér pedig mágneses teret kelt. Képzeljünk el két hullámot, amelyek egymással azonos fázisban haladnak, mint a megfeszített kötél mentén mozgó hullámok, ha a kötél végét ide-oda rázzuk. Tételezzük fel, hogy az elektromos hullámok a kötél függőleges irányú kitérésének felelnek meg, ebben az esetben a mágneses hullámoknak az elektromosra merőleges, oldalirányú, jobbra-balra kitérésnek kell megfelelniük. Az elektromos tér erőssége a kötél bármely pontjában folyamatosan változik, ahogy a hullámok tovahaladnak az adott ponton keresztül. A változó elektromos tér azonban mágneses teret kelt. Tehát a kötél minden egyes pontjában a mágneses tér is folytonosan változik, ahogy a hullámok áthaladnak. A változó mágneses tér viszont elektromos teret kelt. A két, változó tér fénysugár formájában kéz a kézben halad, mindegyik felelős a másik létrehozásáért, a folyamatot a fényforrás által kibocsátott energia hajtja.

1864-ben azonban még messze jártak ettől a világos képtől. Az Encyclopaedia Britannica egyik cikkében maga Maxwell még 1878-ban is az éter elképzelése mellett érvelt: „Bármekkora nehézségekkel is találjuk szembe magunkat, amikor konzisztens elképzelést akarunk alkotni az éter szerkezetéről, afelől nem lehet kétségünk, hogy a bolygóközi és csillagközi teret valamilyen anyagi közeg vagy

test tölti lei.”³⁰

Maxwell halálakor elmélete már széles körű támogatottságnak örvendhetett, ám csak egy évtizeddel később, a rádióhullámok vizsgálatának eredményeképpen vált a fény egyedül üdvözítő elméletévé. Az éterre halálos csapást mérő kísérletet (amelyet részben az Encyclopaedia Britannica 1878-as cikke ihletett) ugyancsak az 1880-as években végezték el, bár ennek az eredménynek a jelentősége csak a XX. század hajnalán vált igazán nyilvánvalóvá. Amikor Maxwell 1879 novemberében meghalt, még csak nyolc hónapos csecsemő volt az az ember, aki rámutatott a Maxwell-egyenletekben szereplő c állandó valódi jelentőségére, és aki az említett kísérletet is helyes megvilágításba helyezte. Albert Einsteinról van szó, akinek a színre lépésével a fizika tudományában megkezdődött a modern kor.

2. Modern idők

Isaac Newton tudott a mozgás relativitásáról, akárcsak a XIX. század fizikusai. A Hold a Földhöz viszonyítva kering a pályáján, a Föld pedig a Naphoz képest mozog. Ha autónkkal 50 km/h sebességgel hajtunk, és megelőzünk egy 15 km/h-val haladó kerékpárost, akkor a két jármű relatív sebessége 35 km/h. Amikor Maxwell egyenletei pontos sebességet adtak meg a fény sebességére, akkor magától értetődően merült fel a fizikusokban, hogy ez nyilvánvalóan a fény sebessége az éterhez képest, vagyis ahhoz a közeghez viszonyítva, amelyről feltételezték, hogy a fény továbbítója. Minthogy azonban a Föld közelítőleg kör alakú pályán kering a Nap körül, nem mozoghat mindvégig azonos sebességgel az éterhez képest. Néha az egyik irányban mozog, fél év elteltével viszont, pályája áttelleges oldalán éppen az ellenkező irányban halad. Ha összevetjük egymással Newton elképzelését a mozgások viszonylagosságáról és azokat az elképzeléseket, amelyek szerint a fény az éterben terjedő elektromágneses hullám, akkor magától értetődően adódik a következtetés, hogy a fény Földhöz viszonyított sebességének az év különböző szakaszaiban különbözőnek kell lennie.

Egyes csillagászok sikertelenül próbálták meg kimutatni ezt az eltérést a csillagok és a bolygók fényében, a különböző évszakokban végzett mérések alapján. Lehetőség van azonban a különbség kimutatására a Földön végzett, laboratóriumi kísérlettel is. Ha a fénysugár a Föld térbeli mozgásával azonos irányban halad, akkor akár még a megelőzésével is megpróbálkozhatnánk, hiszen mérőműszereinkhez képest valamivel lassabban mozog. Ezzel szemben a Föld térbeli mozgási irányára merőlegesen haladó fénysugárnak pontosan a Maxwell-egyenletekben szereplő c sebességgel kell mozognia.

Természetesen a Föld mozgása által kiváltott hatás a fény sebességéhez képest

30 Lásd például Zajonc: Catching the Light, 146. oldal.

nagyon kicsi. A fény sebessége (megközelítőleg) 300 000 km másodpercenként, a Föld pályamenti mozgásának sebessége viszont csupán 30 km/s - vagyis körülbelül a fénysebesség 0,01 százaléka. Az Encyclopaedia Britannica számára az éterről írott cikkében Maxwell megmutatta, miként lehet a Föld éterhez képest mérhető mozgási sebességét megállapítani, úgy, hogy a méréshez magát a fényt használjuk fel. Elvben lehetséges lenne egy fénysugarat két részre bontani, majd mindkét fénynyalábot elküldeni egy kisebb „utazásra”, ide-oda, két tükör között. Ám az egyik fénynyaláb ezt az utat a Föld pályamenti mozgásával egyező, a másik pedig arra merőleges irányban tenné meg. Ezután a két sugarat egyesíthetnénk, lehetővé téve interferenciájukat, éppen úgy, ahogyan az a Young-féle kétréses kísérletben történik. A két nyalábnak a Földhöz képest kicsit eltérő sebességgel kellene haladnia. Ezért, feltételezve, hogy a kísérletet a legnagyobb gondossággal állítottuk össze, ha mindkettő ugyanakkora távolságot tesz meg, akkor mire megérkeznek, fázisuk már kicsit el fog térni egymásétól, vagyis interferenciaképnek kell megjelennie. Az interferenciacsíkok távolsága pontosan elárulná, mekkora a Föld sebessége az éterhez képest. Maxwell következtetése szerint azonban a hatás kimutathatatlanul kicsiny. Ennek ellenére egy fiatal amerikai kutató csaknem azonnal felvette a kesztyűt.

Az éter halála

Albert Michelson valójában 1852-ben Németországban született, azonban családja még gyermekkorában kivándorolt az Egyesült Államokba. Az USA annapolisi Tengerészeti Akadémiáját 1873-ban végezte el, majd kétévi tengeri szolgálat után tanári állást kapott az akadémián. Fizikát és kémiát tanított, előbbi keretében egyik feladatként be kellett mutatnia az akadémián tanuló tengerészkadétoknak, miként lehet megmérni a fény sebességét. A kor hagyományos kísérletének eredményével azonban elégedetlen volt, ezért elhatározta, hogy tökéletesíti a módszert. Ennek érdekében pontosabb kísérletet dolgozott ki. Az ennek során szerzett gyakorlat képessé tette őt arra, hogy elfogadja a Maxwell Britannica-beli cikkében leírt kihívást, és az interferometrikus módszerrel megmérje a Föld mozgási sebességét az éterhez képest. Ennek nyomán élete végéig egyre jobb interferométereket készített, amelyeket a két fénynyalábbal végzett kísérlet egyre pontosabb végrehajtására használt.

A Michelson által a fénysebesség mérésére használt módszer a fénysugár forgó tükrökről történő visszaverődésén alapult. Az eljárás úttörője a francia Jean Foucault volt, aki 1819 és 1868 között élt, feltalálta a giroszkópot, és híres ingakísérletével kimutatta a Föld forgását. A fénysebesség Foucault-féle mérése során a fénysugár egy nagyon gyorsan forgó síktükrőről verődik vissza. A visszavert sugár ezután egy távolabbi, álló tükrőről visszaverődik, és ismét a forgó tükrökre esik, amely azonban már kissé elfordult, mialatt a fénysugár oda-vissza befutotta a tükrök közötti távolságot. A fénysugár haladási irányának a tükrök forgása miatt bekövetkező eltérüléséből ki lehetett számítani, mennyi idő alatt tette meg kétszer a fény a két tükör közötti távolságot.

Foucault ezzel a módszerrel bizonyította be 1850-ben, hogy a fény vízben lassabban terjed, mint levegőben, bebizonyítva ezzel egyúttal a fény hullámtermészetét is. 1862-re már annyira tökéletesítette a berendezést, hogy a fény tényleges terjedési sebességét is ki tudta számítani. Erre a 298 000 km/s értéket kapta, ami mindössze egy százalékkal kisebb a legjobb mai értéknél.

Michelson tovább finomította az eljárást, és újabb tükröket épített a rendszerbe, valamint megnövelte a fény által befutott út hosszát. Egyetlen forgó tükör helyett nyolcszögletű (majd később nyolcnál több szögletű), külső oldalán tükrökkel borított dobot használt a fénysugár eltérítésére. Amikor a dob ismert sebességgel forgott, a nyolc tükör mindegyike pontosan ismert időközönként fordult a megfelelő helyzetbe ahhoz, hogy a megfelelő irányú tükröződés jöjjön létre. A dob forgási sebességét változtatva el tudta érni, hogy a dob egyik oldaláról az álló tükör felé visszaverődő fény onnan visszaérkezve pontosan a dob valamelyik másik oldaláról verődjék tovább. Ebből Michelson ki tudta számítani, mennyi időt töltött úton a tükrök között.

Kísérlete végső változatát 1926-ban, 73 éves korában építette meg, ebben a fénysugár két, egymástól 70 km távolságra fekvő, kaliforniai hegycsúcs között verődött vissza. A kísérlet eredményeképpen Michelson $299\,796 \pm 4$ km/s értéket kapott a fénysebességre. Ez a kísérlet hibahatárán belül egyezik a fénysebesség elfogadott, mai értékével, ami 299 792,5 km/s. Amikor megkérdezték, miért törekszik még ilyen idős korában is c értékének egyre pontosabb megmérésére, azt válaszolta: „mert olyan jó szórakozás.”³¹ Michelson 1931-ben, élete 79. évében halt meg, de még élete végén is abban lelte örömét, hogy a fénysebesség egyre pontosabb mérésére tervezett kísérleteket.

Az 1890-es évek elején Michelson egy Edward Morley nevű kollégájával együtt megmérte a Párizsban őrzött szabványméter hosszát, úgy, hogy a hosszúság egységének a színek egy meghatározott, vörös tartományának a hullámhosszát használták; ezzel messze megelőzték korukat, de 1960-ban lényegében ugyanezt a módszert fogadták el a méter hosszának a fény tulajdonságai alapján történő definiálására.³² A területen végzett úttörő jelentőségű erőfeszítései, a fénysebesség mérése és a pontos optikai berendezések építése terén elért eredményei elismeréseképpen Michelson volt az első amerikai, akit Nobel-díjjal tüntettek ki - 1907-ben kapta meg a fizikai díjat. Ma már azonban a neve elsősorban arról a kísérletről híres, amelyet az 1880-as évek második felében Morleyvel együtt végzett el.

1880-ban Michelson elhagyta Annapolist, szándékai szerint csak egy átmeneti időre, mert tanulmányútra ment Európába, hogy Berlinben, Heidelbergben és Párizsban dolgozhasson. Természetesen olvasta Maxwell cikkét a Britannicában az éterről, ezért már 1881-ben, amikor Hermann Helmholtz berlini laboratóriumában dolgozott, megpróbálta a Föld éterhez képest történő mozgását kimutatni. A

31 Idézi Weber: Pioneers of Science, 33. oldal.

32 A munkában elévülhetetlen érdemeket szerzett Bay Zoltán, az 1948-tól haláláig az Egyesült Államokban élő magyar fizikus (a fordító megjegyzése).

Maxwell által javasolt módszert alapján, saját tervezésű interferométerével dolgozott, amelynek megépítéséhez Alexander Graham Bell alapítványa nyújtott pénzügyi támogatást. A megjósolt hatásnak azonban nem sikerült a nyomára bukkannia. Emiatt azonban abban az időben még senki sem aggódott különösebben, mert a kísérlet felettébb bonyolult volt (és emiatt számos hibalehetőséget rejtett). Amúgy is, korábban már felvetődött, hogy a Föld esetleg a saját környezetében magával vonszolja az étert, ezért a Föld felszínén végzett kísérletekkel eleve lehetetlen kimutatni bármiféle „sodródást az éterhez képest”.

Michelson végül is soha többé nem tért vissza Annapolisba, sőt visszavonult a haditengerészet állományából, és 1882-ben Clevelandben (Ohio) a Case School of Applied Science fizika professzora lett. Egyik első munkájaként megmérte a fénysebességet, amire $299\,845\text{ km/s}$ -ot kapott eredményül. Ez abban az időben nagyon pontos mérésnek számított, pontosságát egy évtizeden keresztül nem is sikerült felülmúlni, azután is csak magának Michelsonnak.

1885-ben azonban Hendrik Lorentz holland fizikus kimutatta, hogy a Föld nem vonszolhatja magával az étert, a csillagászati mérések pedig összeegyeztethetetlenek azzal az elképzeléssel, mely szerint a fény állandó sebességgel mozog az éterhez képest, miközben a Föld mozog az éterben. Ez arra ösztönözte Michelsont, hogy fogjon össze Edward Morleyvel, aki akkor a kémia professzora volt szintúgy Clevelandben, a Western Reserve University elődjén.

Michelsonhoz hasonlóan az 1838 és 1923 között élt Morley is a pontos méréseknek szentelte életét, megmérte többek között a levegő oxigéntartalmát és az oxigén atomsúlyát. Michelsonnal közösen megépítették az interferométeres kísérlet tökéletesített változatát, és újra megpróbálták megmérni a Föld mozgását az éterhez képest. 1887-ben igazolták Michelson korábbi eredményét, de immár olyan hihetetlen pontossággal, hogy a továbbiakban nem lehetett abban reménykedni, hogy tulajdonképpen létezik valamilyen hatás, csak éppen a műszereink nem elég érzékenyek a kimutatására. Semmiféle bizonyítékot sem sikerült találni tehát a Föld mozgására az éterhez képest. Vagy másképpen fogalmazva, bebizonyosodott, hogy a fénysebesség mindig pontosan ugyanakkora, bármilyen irányban is halad a fénysugár a Föld mozgási irányához képest.

Hogy lehetséges ez?

Irány a speciális relativitáselmélet

Jobban meggondolva a dolgot, arra éppúgy nincs bizonyíték, hogy egyáltalán létezik az éter. Amikor ugyanis az éterről elmélkedünk, kiderül, hogy ennek a fogalomnak a viktoriánus korban elterjedt értelme szerint nagyon sajátos tulajdonságokkal kellene rendelkeznie. Mindenekelőtt nagyon merevnek kellene lennie, hiszen a fényhullámoknak roppant gyorsan kell terjedniük benne. Minél merevebb egy közeg, annál gyorsabban tudnak tovaterjedni benne a rezgések - a hang például egy acélrúdban sokkal gyorsabban terjed, mint levegőben. Persze a hang sebessége levegőben csupán $344\text{ méter másodpercenként}$, és még acélban

is csak 5000 m/s. Képzeljünk csak el egy olyan merev közeget, amelyikben a tovaterjedő rezgések sebessége 300 000 kilométer másodpercenként, és akkor némi fogalmat alkothatunk arról, milyennek kellene lennie az éternek.

Másrészt viszont az éternek nagyon hígnak kell lennie. Végül is a Föld látszólag akadálytalanul mozog az éterben - pályamenti mozgása nem lassul az éterben fellépő közegellenállás vagy súrlódás hatására. Ráadásul az éternek mindenütt jelen kell lennie, még a levegő atomjai és molekulái között is, ha ott is továbbítani akarja a fényhullámokat. Mindannyiszor, amikor csak lépünk egyet, át kell gázolnunk az éteren, sőt még be is lélegeznénk anélkül, hogy a legcsekélyebb hatása lenne a szervezetünkre azon kívül, hogy a fényt az egyik helyről a másikra továbbítja.

Talán a XIX. század tudósai Michelson és Morley munkássága nélkül is hamarosan úgy döntöttek volna, hogy az éter fogalmát ki kell dobni a fizikából. Ugyanakkor egy generáció elteltével még az alternatív javaslatot, Faraday erőtereit sem fogadták el teljes mértékben, noha Maxwell egyenletei kimutatták, miként tudnak a változó elektromos és mágneses terek kéz a kézben, elektromágneses hullám formájában tovaterjedni. Az éter halálának is eljött azonban az ideje.

Michelson és Morley 1887-ben számoltak be kísérletük eredményéről. Nem sokkal ezután már megmutatkoztak az első jelei annak, milyen gyökeresen át kell alakítaniuk a fizikusoknak a világról alkotott képüket, ha meg akarják magyarázni a fény viselkedését. George Fitzgerald ír fizikus, aki 1851-ben Dublinban született, már beírta a nevét a tudomány történetébe, amikor helyes előrejelzést adott arra, miként kelti az oszcilláló elektromos áram azt a jelenséget, amelyet ma rádióhullámoknak nevezünk. Ezzel utat mutatott Heinrich Hertz kísérletei számára. Nos, 1889-ben Fitzgerald magyarázattal állt elő a Michelson-Morley-kísérlet negatív eredményére. Szerinte a kísérlet során azért nem sikerült kimutatni a legcsekélyebb változást sem a fénysebességben, attól függően, milyen irányban mozog a fénysugár a Földhöz képest, mert az egész kísérleti berendezés (és természetesen maga a Föld is) összehúzódik a mozgás irányában. Ez megoldaná a problémát - a fény sebessége a Földhöz képest „valóban” a Föld éterhez képest végzett mozgásától függne, ám a mérőeszköz pontosan olyan mértékben húzódná össze, ami azt a látszatot kelti, mintha a fénysebesség változatlanul c lenne.

Az ötlet nem teljesen örvültség. A fizikusok már tudták - valójában maga Maxwell mutatta ki -, hogy a két elektromos töltés között fellépő erő attól is függ, milyen mozgást végeznek. A nagyobb erő jobban egymáshoz préseli a dolgokat, márpedig Fitzgerald azt vetette fel, hogy ha a test mozog (természetesen hallgatólagosan itt is feltételezi, hogy az objektum az éterhez képest mozog), akkor az atomjait és molekuláit összetartó erők válnának erősebbekké, ami egymáshoz közelebb préseli az atomokat, molekulákat, vagyis a test összenyomódik.

Ugyanezt az elképzelést vetette fel tőle függetlenül Hendrik Lorentz is az

1890-es években. A jelenséget- véleményem szerint kissé méltánytalanul - azóta Lorentz-Fitzgerald-kontrakciónak nevezik, holott a Fitzgerald-Lorentz-kontrakció igazságosabb lenne. Ám Lorentz, aki 1853 és 1928 között élt, és az elektromágnesség területén végzett munkájáért 1902-ben megkapta a fizikai Nobel-díjat, Fitzgeraldnál sokkal messzebbre jutott az ötlet részleteinek kidolgozásában. Három évvel Fitzgerald halála után, 1904-ben kidolgozta a Lorentz-transzformációk-nak nevezett egyenletrendszerét, amely leírja, miként „transzformálódnak” egy mozgó testnek a hosszúságán kívül egyéb tulajdonságai is, amikor egy az övétől eltérő sebességű megfigyelő vizsgálja azokat.

Valójában Lorentz azokat a transzformációs egyenleteket adta meg matematikai formában, amelyek segítségével meg lehet állapítani, milyennek látszanak különböző sebességgel mozgó megfigyelők számára az elektromágneses terek. A transzformációk beépítik a megfigyelő sebességét a Maxwell-egyenletekbe. Albert Einstein volt az, aki egy évvel később megmutatta, hogy ugyanez a transzformáció a mechanikai rendszerekre is érvényes, és bebizonyította, hogy nemcsak a hosszúság, hanem az idő, a sebesség, sőt még a tömeg is másnak látszik a különböző sebességgel mozgó megfigyelők számára. Különös, hogy bár Einstein kiindulópontként használta Lorentz elektromágnesességgel kapcsolatos eredményeit, mégis a speciális relativitáselmélet kidolgozásakor nem befolyásolta őt a Michelson-Morley-kísérlet eredménye, miszerint a fénysebesség mindig ugyanakkora. Élete végén, 1954-ben, tehát egy évvel a halála előtt egy kérdésre válaszolva elmondta, hogy a kísérlet „nem gyakorolt rám jelentős hatást. Még arra sem emlékszem, hogy tudtam-e egyáltalán róla, amikor (1905-ben) megírtam első cikkemet a témáról.”³³ De ha ez nem, akkor vajon mi indította őt arra, hogy azokról a dolgokról kezdjen gondolkodni, amelyek a XX. század első évtizedében forradalmasították a fizikát?

Einstein ösztönös megérzése

Einstein 1905-ben 26 éves volt. 1900-ban elvégezte a zürichi Szövetségi Műszaki Főiskolát (az ETH-t), majd 1902-től kezdődően Bernben, a svájci Szabadalmi Hivatalban dolgozott, műszaki szakértőként - neki kellett elbírálni a benyújtott új találmányok műszaki (vagy egyéb) értékét. Akadémiai karrierre vágyott, ám úgy tűnt, számításait keresztülhúzta az a hiba, amelyet elkövetett: nem vette kellően komolyan az ETH által kínált formális oktatást. Bár a záróvizsgáit meglehetősen sikeresen letette, ám lusta diák hírében állt, ezért magára haragított néhány professzort, akik segíthettek volna neki kutatói állást találni. A Szabadalmi Hivatalban azonban könnyű volt a munka, ezért maradt ideje a fizikára is - annyi, hogy nemcsak több tudományos dolgozatot publikált, hanem teljes doktori disszertációját is elkészítette néhány év alatt. Végül a speciális relativitáselmélet hozta meg számára az áttörést.

Einstein élete és további eredményei több kötetet megtöltenének (és töltenek is),³⁴ ám e helyütt csak a speciális relativitáselmélettel kívánok foglalkozni, és azzal, amit az elmélet a fény természetéről elárul. Einstein különleges tehetségével ösztönösen megérezte a problémák fizikai lényegét. A matematika soha nem volt az erőssége, bár természetesen az átlagembernél jobban értett hozzá, de a szíve csücske mindig a fizika maradt. A speciális relativitáselmélet felé egy ösztönös megérzés vezette őt, arról, hogy valójában miről is szólnak a Maxwell-egyenletek. Azon töprengett, mi történne, ha felülhetnénk egy fénysugárra, és vele azonos sebességgel száguldhatnánk.

Emlékezzünk csak vissza, Maxwell egyenleteinek az volt a lényege, hogy a változó elektromos tér hozza létre a hullám (változó) mágneses részét, és a változó mágneses tér kelti a hullám elektromos részét. Ám ha a hullámhoz hasonlóan mi magunk is fénysebességgel mozognánk, akkor a mi szemszögünkből nézve egyáltalán nem lenne jelen a „hullámzás”. Az általunk látott kép stacionárius lenne, mintha a tó felszínén kialakult vízhullám hirtelen megfagyna. Maxwell egyenletei teljesen egyértelműen azt állítják (és természetesen a kísérletek is ugyanezt bizonyítják), hogy a stacionárius mágneses tér nem kelt elektromos teret, és megfordítva, az állandó elektromos tér sem gerjeszt mágneses teret. Egyszerűen semmiféle hullám nem lenne jelen - még befagyott állapotban sem.

A probléma ismét a mozgás relativitására vezethető vissza. Maga Newton felismerte ugyan a mozgás relativitását, tehát tisztában volt vele, hogy az emberek a Földhöz képest mozognak, a madarak a levegőhöz képest repülnek, a hajók pedig a tenger vizéhez képest haladnak előre, mégis úgy gondolta, hogy léteznie kell valamilyen végső vonatkoztatási rendszernek - a nyugalom egyetemes állapotának -, amelyre minden mozgás vonatkoztatható. Az éter fogalma jól illeszkedett ebbe a képbe, hiszen minden mozgást az éterhez lehetett viszonyítani. Newton abban is hitt, hogy létezik valamilyen abszolút és egyetemes idő, valamiféle Isten órája, amely megfellebbezhetetlenül ugyanolyan ütemben jár mindenki számára. Ugyanakkor azonban ezeket az ésszerű gondolatokat nem lehetett összhangba hozni a Maxwell-egyenletekkel.

Einstein rájött, hogy egyáltalán nincs szükség kitüntetett vonatkoztatási rendszerre. Nem kell léteznie a Világegyetemben a nyugalom egyetemes állapotának, amelyre minden mozgást vonatkoztatni lehet. Ezzel szemben ő azt állította, hogy minden mozgás relatív - tehát mindenki tetszés szerint kikiálthatja magát nyugvó helyzetben lévőnek, és attól kezdve minden mozgást saját magához viszonyíthat. Szigorú értelemben a mozgásoknak ez a relativitása csak az egymáshoz képest állandó sebességgel mozgó megfigyelőkre érvényes - vagyis azokra, akik és amelyek egyenes vonalú és állandó sebességű mozgást végeznek. A gyorsuló vonatkoztatási rendszerekben tartózkodók következtethetnek saját mozgásukra - az ilyen erők miatt érezzük saját súlyunkat megváltozni, amikor egy gyors lift elindul velünk vagy megáll, és ugyanezért érzünk oldalirányú taszítóerőt, ha nagy sebességgel kanyarodó járművel utazunk.

³⁴Saját hozzájárulásomat ehhez az Einstein-iparághoz Michael White-tal közösen utam, a részleteket az Irodalomjegyzék tartalmazza.

E megszorítás miatt kapta az elmélet a „speciális” jelzőt. Einstein általános relativitáselmélete az alapgondolatot a gyorsuló mozgásokra, a görbe pályán történő mozgásokra és a gravitációra is kiterjesztette. Szerencsére ebben a könyvben nem lesz olyan dolgokról szó, amelyek megértéséhez az általános relativitáselméletre lenne szükség.

Ami a fénynyalábot alkotó elektromágneses hullámokat illeti, azok nem tudják, vagy nem is törődnek vele, milyen sebességgel mozog a hullámok forrása. Ha egyszer már létrejöttek, akkor a Maxwell-egyenletek által meghatározott c sebességgel száguldva szétterjednek a térben.

Ha minden megfigyelő állandó sebességgel mozogna (a fizika zsargonja szerint minden megfigyelő inerciarendszerben helyezkedne el), akkor mindegyikük teljes joggal állíthatná, hogy nyugalomban van, és minden mozgást rá kell vonatkoztatni, következésképpen a fizika törvényeit tökéletesen egyformának kellene találniuk. Ha végrehajtok egy kísérletet a saját, a Földhöz képest a fénysebesség háromnegyedével száguldó űrhajómban, akkor ugyanazt a „választ” kell kapnom, amit egy másik kísérletező, a Földhöz képest csak fél fénysebességgel haladó űrhajójában kap. Ha különböző választ kapnánk, akkor el tudnánk dönteni, melyikünk mozog „valójában”, és melyikünk nem.

Miként kell tehát módosítanunk a valóság Newton szerinti leírását, ha azt akarjuk elérni, hogy az inerciális megfigyelők a fizikai kísérleteikre mindig és mindenütt ugyanazokat a válaszokat kapják? Einstein a válaszhoz azon gondolkodott el, milyennek látszana egy fényforrásból kiinduló elektromágneses impulzus a különböző sebességgel mozgó megfigyelők szempontjából. A fényforrás vonatkoztatási rendszerében a fény a térben gömbszimmetrikusan szétterjedő gömbhéjakat alkot. Eszerint tehát minden inerciarendszerbeli megfigyelőnek gömb alakú héjakat kell látnia, mert különben rájönne, hogy mozog. A fénygömb egyetlen módon látszhat gömb alakúnak minden inerciarendszerbeli megfigyelő számára, ha a fényforráshoz képest végzett mozgásuk következtében mérőrúdjaik összehúzódnak. Ez az összezsugorodás pontosan megfelel a Lorentz-transzformációval kiszámított Lorentz-Fitzgerald-kontrakciónak. Van itt azonban még valami érdekes - nevezetesen, ebben az esetben a sebességek nem úgy adódnak össze, ahogyan azt a hétköznapi életben, a newtoni elképzelések alapján megszoktuk.

A newtoni gondolkodásmódunkkal azt mondanánk például, hogy ha egy űrhajót látunk magunk mellett a fénysebesség háromnegyedével ($0,75 c$) elrepülni, egy másik űrhajó pedig vele ellentétes irányban, ugyancsak $0,75 c$ sebességgel repül, akkor egymáshoz viszonyított sebességüknek $1,5 c$ -nek kell lennie. A Lorentz-transzformáció értelmében azonban mindkét űrhajóban ülő megfigyelő a másik jármű sebességét $0,96c$ -nek méri. Sőt mi több, ha bármelyik űrhajó utasa kibocsát egy fényjelet, akkor a fényimpulzust alkotó elektromágneses hullám sebességét a másik megfigyelő c -nek találja, nem pedig $1,75 c$ -nek. Valójában nincs mód arra, hogy két, c -nél kisebb sebességet a Lorentz-transzformáció szabályai szerint összeadva eredményül c -t kapjunk, nem is beszélve a c -nél nagyobb eredményekről. Ez egyebek között azt is jelenti, hogy ha a fénysebességnél

lassabban indulunk, majd egyre gyorsulunk (egyre jobban megnöveljük saját sebességünket), akkor sem érhetjük el soha a c fénysebességet. Valamilyen vonatkoztatási rendszerben mérve sebességünk folyamatosan nőhet - $0,9c$ -ről $0,99c$ -re, majd tovább $0,999c$ -re, és $0,9999c$ -re, és így tovább - ám magát a fénysebességet soha nem érhetjük el (és persze mindahányszor megmérjük magunkhoz képest a fény sebességét, mindannyiszor pontosan c -t kapunk eredményül).

Érdemes ezt még egyszer, részletesebben elmondani, mert ez a kvantummechanika rejtélyei legjobb megoldásának egyik legfontosabb vonása:

A speciális relativitáselmélet értelmében lehetetlen egy fénysugár mellett, azzal megegyező sebességgel haladni; valamilyen kiválasztott vonatkoztatási rendszerben a sebességünket folyamatosan növelve elvben tetszés szerinti mértékben megközelíthetjük a fénysebességet, de azt el nem érhetjük. Függetlenül attól, milyen közel jutottunk a fénysebességhez, ha megmérjük a fénynyaláb sebességét, azt mindig c -nek fogjuk találni.

A speciális relativitáselméletnek számtalan lebilincselő következménye és utóhatása van, amelyek részletes ismertetésétől ezúttal hely hiányában eltekintek. Ebből az elméletből tudjuk például, hogy a tömeg és az energia egyenértékűek, közöttük a híres, $E=mc^2$ összefüggés adja meg a kapcsolatot. Ez az elmélet egyesíti a teret és az időt az egységes téridővé. Van azonban az elméletnek egy olyan megállapítása is, amelyik különösen aktuális jelen könyvünk témája szempontjából, nevezetesen, a speciális relativitáselmélet értelmében a mozgó órák lassabban járnak. Nem létezik Isten által adott, abszolút téridő, amelyik minden megfigyelőre vonatkozna.

Az úgynevezett idődilataciót ugyanaz a Lorentz-transzformáció írja le, mint a Lorentz-Fitzgerald-kontrakciót. A jelenséget például úgy képzelhetjük el, hogy nem az egymástól független térre és időre gondolunk, hanem az egyesített téridőre. Hermann Minkowski, aki korábban Einstein egyik tanára volt az ETH-n, 1908-ban állt elő azzal az ötlettel, hogy az idő szó szerint a negyedik dimenziónak tekinthető, és az időben előre- és hátrafelé mozgást ugyanúgy lehet elképzelni, mint a térben az előre-hátra, fel-le és jobbra-balra elmozdulásokat. Az egyetlen alapvető fontosságú különbséget az jelenti, hogy az erre vonatkozó egyenletekben az idő a térrel ellentétes előjellel jelenik meg; hagyományosan a térbeli dimenziókat „+”, az időt pedig „-” jelöli, bár az egyenletek az ezzel ellentétes megállapodás esetén is működnek. Ennek eredményeképpen a mozgás hatására a távolságok összezsugorodnak, az időtartamok viszont megnyúlnak. A két hatás pontosan megfelel egymásnak, ennek megfelelően a mozgó tárgy térbeli összezsugorodását pontosan kiegyenlíti az, amennyivel az idő kitágul számára.

A relativitáselmélet szakértői a testeket úgy írják le, mint amelyeknek négydimenziós hosszuk, más szóval kiterjedésük van, amely állandó marad, függetlenül attól, milyen mozgást végez a test. A test mozgásától függően (vagy az észlelő mozgásától függően a testhez képest) a térbeli és időbeli kiterjedés

változására három lehetőség van.

Valami hasonló történik három dimenzióban is, amikor egy ceruzát valamilyen fényforrás alá tartunk, és megnézzük az asztalra vetett árnyékát. Attól függően, milyen helyzetben tartjuk a ceruzát, az árnyékának a hossza különbözőképpen viszonyulhat a ceruza valóságos hosszához. Az árnyék hossza a nulla és a ceruza tényleges hossza között bármekkora lehet, jóllehet a valóságos hossza közben nem változik. A három dimenzióban egyenletes sebességgel történő mozgás matematikailag egyenértékű a tárgy helyzetének a változtatásával a négydimenziós téridőben, és az árnyék hosszának változása egyenértékű a test különböző mértékű összehúzódásával, míg az idődilatáció ezzel ellentétes irányban működik, megnő, amikor az árnyék összezsugorodik. A bennünket körülvevő háromdimenziós világ lényegében a négydimenziós téridő árnyképe.

A felsorolt jelenségek egyike sem mutatkozik azonban meg, amíg a szóban forgó sebességek nem érik el a fénysebesség számottevő hányadát. A legfontosabb azonban kijelenteni, hogy akkor viszont igenis megmutatkoznak, mégpedig pontosan az Einstein elmélete által megjósolt módon. A speciális relativitáselméletet számtalan kísérlettel ellenőrizték, és az elmélet minden egyes próbatételen tökéletesen megállta a helyét. A következőkben csak az idődilatáció működésének klasszikus példáját fogom ismertetni.

A Föld légkörét az úgynevezett kozmikus sugárzás formájában szakadatlanul bombázzák különféle elemi részecskék a világűrből. Amikor ezek a részecskék kölcsönhatásba lépnek a felsőlégkör atomjaival, gyakran keltik más részecskék, az úgynevezett müonok záporát. Ezek a müonok nagyon rövid élettartamúak. Müonként csak néhány mikroszekundumig léteznek, ezután más részecskékké bomlanak el. Bár a fényéhez képest számottevő sebességgel mozognak, mégsem élnek elegendő ideig ahhoz, hogy az időről alkotott hétköznapi fogalmaink szerint átjussanak a légkörön és elérjék a Föld felszínét. Ennek ellenére a részecskefizikusok a keletkező müonok legtöbbször a Föld felszínén is érzékelni tudják. Az ellentmondás magyarázata egyszerű: minthogy ezek a müonok a Földhöz képest rendkívül gyorsan száguldanak, számukra az idő lelassul. Pontosabban szólva a speciális relativitáselmélet szerint a müonok élettartama a 9-szeresére nő a mi óráink szerint mért időben, ahhoz képest, mintha nyugalomban lennének.

Emlékezzünk azonban vissza arra, amit korábban mondtunk: a speciális relativitáselmélet megengedi, hogy a müonok nyugvónak tartsák önmagukat. Saját vonatkoztatási rendszerükben viszont minden bizonnyal el kellene bomlaniuk, még mielőtt elérik a felszínt. Nos, egyáltalán nem! Ha a müonokat nyugalomban lévőnek tekintjük (azaz hozzájuk rögzítjük vonatkoztatási rendszerünket), akkor a Föld a müonok felé rohan, méghozzá a fénysebesség számottevő hányadával. Ennek következtében természetesen a Föld összezsugorodik, legalábbis a müonok szempontjából nézve, méghozzá a Lorentz-transzformáció által előírt mértékben. Minthogy a szóban forgó sebesség ugyanakkora, és mivel az egyenletekben a tér és az idő szimmetrikusan jelenik meg, az összehúzódás mértéke pontosan ugyanakkora lesz, mint az idődilatációé.

volt az előző esetben - vagyis kilencszeres. Mivel az egyenletekben a tér és az idő előjele ellentétes egymással, a Föld légköre 9-ed részére zsugorodik. A műonok szempontjából tehát csak 9-szer kisebb távolságot kell megtenni ahhoz, hogy elbomlásuk előtt leérkezzenek a Föld felszínére, ehhez viszont elegendően hosszú az élettartamuk.

A speciális relativitáselmélet nem csupán holmi örült hipotézis, hanem olyan elmélet, amelyik eleget tesz a kísérleti ellenőrzés Newton-féle kritériumának - „megmagyarázza a dolgok tulajdonságait”, és „kísérletek elvégzésére készlet”, amely kísérletek (sikeresen) felhasználhatók a magyarázatok ellenőrzésére.

De vajon mi történik akkor, amikor az idődilatació húrját a legvégső határig feszítjük? Visszatérve az eredeti, Einsteint foglalkoztató kérdéshez, milyennek „látszana” a Világegyetem egy fénysugár (vagy foton, ha úgy jobban tetszik) számára, vagy esetleg a fénysugarat meglovagoló megfigyelő szemével nézve? És vajon hogyan múlik az idő a foton számára?

Kezdjük a választ a második kérdéssel - sehogyan. A Lorentz-transzformáció szerint a fénysebességgel mozgó objektum számára megáll az idő. A foton szempontjából nézve természetesen minden az ellenkező irányba rohan, mégpedig fénysebességgel. Ilyen szélsőséges körülmények közt viszont a Lorentz-Fitzgerald-kontrakció értelmében az objektumok közötti távolság nullára csökken. Akár azt is mondhatjuk, hogy az elektromágneses hullám számára nem létezik az idő, tehát pályája mentén bárhová (a Világegyetem bármely pontjára) egyetlen szempillantás alatt eljuthat; de úgy is fogalmazhatunk, hogy az elektromágneses hullám számára nem létezik legyőzendő távolság, és ezért juthat el egyetlen pillanat alatt bárhová a Világegyetemben.

Ez rendkívül fontos gondolat, ám még soha nem láttam, hogy bárhol is kellő hangsúllyal szerepelt volna. A foton szempontjából nem telik időbe a Nap és a Föld közötti 150 millió kilométeres távolság legyőzése (vagy átszelni az egész Világegyetemet), azon egyszerû oknál fogva, mert a foton számára nem létezik térbeli távolság. Úgy tûnik, mintha a fizikusok nem fordítanak kellő figyelmet erre a fontos körülményre, mert tudják, hogy egyetlen anyagi objektum sem gyorsítható fel a fény sebességére, ezért egyetlen emberi (vagy automatikus) megfigyelő sem tapasztalhatja ezeket a különleges jelenségeket. Talán annyira megrökönyödnek azon, amit az egyenletek mondanak, hogy eszükbe sem jut végiggondolni az összes következményt. Remélem sikerül meggyőznöm Önöket arról, hogy a térnek és az időnek ez a különleges viselkedése a fotonok szempontjából a kvantummechanika minden rejtélyének megoldásához hozzásegíthet. Mielőtt azonban belefognék annak bemutatásába, miként kaphatjuk meg a relativitáselmélet és a kvantumelmélet egyesítésével az elektromágneses jelenségek legkorszerűbb leírását, érdemes egy rövid pillantást vetni a speciális relativitáselmélet egy másik alkalmazására. Einstein egyenletei azt állítják, hogy soha nem érhetünk el a fényét meghaladó sebességet oly módon, hogy két (vagy több) c -nél kisebb sebességet összeadunk. Azt azonban nem állítja a relativitáselmélet, hogy lehetetlen lenne a fénysebességnél gyorsabb utazás.

Gyorsabban a fénynél - vissza az időben

Amint a bevezetőben már jeleztem, a speciális relativitáselmélet nem állítja a fénysebességnél gyorsabb utazás elvi lehetetlenségét. Csupán annyit jelent ki, hogy lehetetlen átlépni a fénysebességet mint határt. Ha egy anyagi részecske a fénynél lassabban mozog, akkor már a fénysebességre történő felgyorsításához is végtelenül sok energiára lenne szükség. Einstein egyenletei azonban gyönyörűen szimmetrikusak a mozgás leírásában, és a szimmetria közepén a fénysebesség helyezkedik el. Eszerint tehát az egyenletek azt is kimondják, hogy ha egy részecske eleve a fénynél nagyobb sebességgel mozog, akkor sebessége mindig nagyobb marad a fényénél. A határsebesség túlsó oldalán tartózkodó részecskék esetében a fénysebességnél kisebb sebességre történő lelassításukhoz lenne szükség végtelenül sok energiára.

Minthogy az egyenletek megengedik az ilyen, a fénynél gyorsabban mozgó részecskék létezését, ezeknek már nevet is adtak: tachyon, ami görögül gyorsat jelent (néhány fizikusok kicsit szemtelenül azt is felvetették, hogy az eredendően a fénynél lassabb részecskék is megérdemelnének egy megkülönböztető jelölést, így ezeket lassúságukra utalva „tardonoknak” nevezték el). Ha valóban léteznek tachyonok, akkor felettébb furcsa világot alkothatnak, ahol a fizika törvényei az általunk ismerteknek éppen a „tükröképei” lehetnek. Az egyenletek szimmetriája a fénysebességre azt jelenti, hogy ez a kritikus sebesség mindkét oldalán bizonyos értelemben távol tartja magától a részecskéket. Olyan, mint egy végtelenül hosszú és végtelenül magas hegylánc, a felénk eső oldalán a magukra hagyott részecskék lecsúsznak a kisebb sebességek felé, a másik oldalon lévő részecskék viszont - energiatánpótlás hiányában a nagyobb sebességek felé csúsznak. Ahogy a mi oldalunkról közeledünk a fénysebesség felé (mászunk fölfelé a hegygerincre), az idő egyre lassabban múlik, míg végül megállna, amikor elérnénk a fénysebességet. Ennek megfelelően nem lenne különösebben meglepő, ha felfedoznánk, hogy a határ túlsó oldalán az idő visszafelé múlik, először lassan, majd egyre gyorsabban, ahogy távolodunk a „gerinctől” - vagyis ahogy a tachyonok sebessége egyre nő, egyre távolabb kerül a határsebességtől.

Amikor a tachyon energiát veszít, akkor a sebessége megnő, mind a térben, mind pedig az időben (visszafelé) gyorsabban mozog. Ezért a részecskék kölcsönhatásában (talán amikor a kozmikus sugárzás részecskéi beleütköznek a Föld légkörébe) keletkező tachyonok sorsa az, hogy egy rövid villanásként minden energiájukat szétsugározzák, miközben felgyorsulnak és eliszkolnak a Világegyetem túlsó szélé felé.

Rendkívül valószínűtlen, hogy ilyen tulajdonságú objektumok valóban létezzenek. Ám, ha a leghalványabb remény van valami ennyire izgalmasnak a felfedezésére, akkor máris érdemes némi figyelmet szentelni a kérdésnek, éppúgy, ahogy a lottószelvényt is megvásároljuk a nagy nyeremény halvány reményében. Ezért aztán egyes fizikusok elkezdték a tachyonok nyomait keresni a kozmikus sugárzás

záporaiban (ez meglehetősen szerény ráfordítást igényel, hiszen a szokványosabb feladatokra használt detektorok amúgy is léteznek). Meglehetősen logikus feltételezni, hogy a tachyonok „nyomát” a kozmikus sugárzás Föld felszínén elhelyezett detektorának előbb kell észlelnie, mielőtt a Föld légkörének felső részén a világűrből érkező részecske becsapódása hatására müonok és hasonló részecskék zápora keletkezik. Nyilvánvaló, hiszen az esemény során esetleg keletkező tachyonok a detektorig tartó útjuk során visszafelé haladnak az időben.

A sci-fi rajongók szerencsétlenségére (no meg a fizikusokéra, akik minden bizonnyal megkapnák a Nobel-díjat a tachyonok kimutatásáért) egyelőre a kísérletek nem szolgáltatnak alapos bizonyítékot a tachyonok létezésére. A tachyonok ötletének egyszerűen csak annyi a jelentősége, hogy rámutat: a relativitáselmélet egyenletei nem zárják ki az időben visszafelé történő mozgás lehetőségét. Senki sem gondol arra, hogy anyagi részecskék - tachyonok - keletkezzenek, amikor az intelligens lények kinyitják az űrhajót és megtalálják az élő vagy a holt macskát, majd ezek a részecskék az időben visszafelé haladva összeomlasztanak az „eredeti” elektron hullámfüggvényét (minden egyéb tényezőtől eltekintve, a részecskék keltéséhez még tachyonok esetében is mc^2 energiára van szükség). Ám ha a fizika törvényei megengednek bármiféle kommunikációt az időben visszafelé, akkor felmerülhet bennünk az igény arra, hogy kiterjesszük vizsgálódásainkat, mi történne űrutazó kiscicáinkkal egy hasonló esetben, valamint hogy megfontoljuk a távolhatás lehetőségét.

Amint azt az *In Search of the Edge of Time* című könyvemben részletesen is kifejtettem, tulajdonképpen a fizika egyetlen törvénye sem tiltja az időutazást (nemcsak a speciális, hanem az általános relativitáselmélet sem). Megvalósítása persze rendkívüli nehézségekbe ütközne, ráadásul a józan ésszel is teljes ellentmondásban állna. Mindamellett, a fizika törvényei nem tiltják, és amint láttuk, józan eszünk már sok esetben vereséget szenvedett, a relativitáselmélettől éppúgy, mint a kvantummechanikától, márpedig mindkét elméletet a newtoni kritériumoknak megfelelően kísérletek támasztják alá.

Ezzel azonban nem fogok részletesen foglalkozni. De azért raktározzuk el valahol tudatunk legmélyén a későbbiekre ezt a lehetőséget. Ebben az esetben egyes kijelentéseim ennek a könyvnek a végén kevésbé lesznek megrázóak az Önök számára. Most viszont térjünk vissza a fényhez, azon belül is az elektromágnesség és a kvantumfizika kapcsolatához.

Színre lép a foton

A XIX. század végére olyannyira elfogadottá vált a fény hullámtermészete, hogy szinte eretnekségnek számított volna azt felvetni, hogy esetleg részecskeként viselkedhet. Ennek ellenére kiderült, hogy pontosan erre van szükség a fény viselkedésének a magyarázatához. Egészen az 1920-as évekig tartott, mire a fizikusok megbarátkoztak (ha egyáltalán valaha is megbarátkoztak) a foton fogalmával és a hullám-részecske kettősséggel.

Az első lépést Max Planck német fizikus, a régi iskola jeles képviselője tette meg, aki 1858-ban született és 1892-re már a berlini Elméleti Fizikai Intézet fizikaprofesszora lett. Az 1890-es évek második felében Planck hihetetlen erőfeszítések árán próbálta megmagyarázni az izzó testek által kibocsátott elektromágneses sugárzás - többek közt a fény - tulajdonságait. A kor más fizikusaihoz hasonlóan ő is egy szinte megoldhatatlan rejtéllyel találta szembe magát. A hullámok viselkedésének klasszikus törvényei szerint - amely törvények egyébként kitűnően leírják a jelenségeket, legyen szó akár a gitár húrjainak a rezgéséről, vagy a tó vizének hullámzásáról - a töltött részecskék könnyebben sugároznak magasabb frekvenciákon (ami rövidebb hullámhosszaknak felel meg). Egy forró test belsejében (például a villanykörte izzószálában) töltött részecskék (elektronok) rezegnek, a hőmérsékletüktől függő sebességgel. A klasszikus kép értelmében bármely forró testnek a spektrum rövid hullámhosszú vége (ibolyántúli sugarak, röntgensugárzás stb.) felé haladva egyre erősebben kellene sugároznia, a hosszabb hullámhosszakon (látható fény, infravörös sugárzás, rádióhullámok) csak nagyon keveset. Villanykörteünk azonban szerencsére nem bocsát ki óriási mennyiségű röntgensugárzást, máskülönben az olvasó aligha élné túl e sorok elolvasását. Valójában bármely forró test a spektrum egy meghatározott sávjában sugároz erősen, amely sáv közepének a hullámhosszát a test hőmérséklete határozza meg. A Nap sárga, mert felszíni hőmérséklete körülbelül 6000 fok, márpedig ennek a hőmérsékletnek megfelelő sugárzási maximum a sárga fény tartományába esik. A vörösén izzó piszkavas valamivel hidegebb a Napnál, ezért a valamivel nagyobb hullámhosszakon, a színekép vörös vége környékén bocsátja ki a legerősebb sugárzást. A hőmérséklet és a sugárzásra jellemző hullámhossz közötti kapcsolatot az úgynevezett feketetest-sugárzási törvény szabja meg, a testre jellemző sugárzást feketetest-sugárzásnak nevezzük. („Feketetest”-ről beszélünk, mert ugyanazok a törvények írják le a sugárzását, amelyek egy tökéletesen fekete felület esetében a sugárzás elnyelését, ami újabb szép példa a fizikai egyenletek szimmetriájára).

Miután már rengeteget dolgozott a problémán és számos zsákutcat is végigjárt, Planck végül 1900-ban talált egy lehetséges kivezetőutat a dilemmából. Rájött, hogy a feketetest-sugárzás természetét akkor lehet megmagyarázni, ha a forró testek nem sugározhatnak ki tetszés szerinti mennyiségű elektromágneses energiát. Ehelyett a kibocsátott (vagy elnyelt, attól függően, milyen irányban használjuk ugyanazokat az egyenleteket) elektromágneses energiának meghatározott nagyságú energiacsomagok formájában kell közlekednie, ezeket a csomagokat Planck kvantumoknak nevezte el. Minden egyes csomag energiája a hullámhosszától függ (az energia a frekvencia és egy állandó szám, a ma Planck-állandó néven ismert konstans szorzataként adódik). Ez a feltételezés az alábbiak szerint magyarázza meg a feketetest-sugárzás sajátosságait.

Bár alapvetően a test hőmérsékletétől függ, hogy milyen sebességgel rezegnek a belsejében az elektronok, azonban a rezgés sebessége nem minden elektron esetében pontosan ugyanakkora. A legtöbbjük az átlagos körüli sebességgel oszcillál, azonban vannak, amelyeknek kicsit több energia jutott, ezért ennél gyorsabban, míg másokra az átlagosnál kevesebb energia jut, ezért valamivel

lassabban rezegnek. Mindig létezik a sebesség valamilyen eloszlása az átlagérték körül, hasonlóan ahhoz, amint az iskolások testmagasságának eloszlása is egy átlagérték körüli szórást mutat. Nagyon magas frekvenciák esetében egy energiakvantum létrehozásához sok energiára van szükség, ezért a forró testben lévő töltött részecskék (az oszcilláló elektronok) közül csak nagyon kevésnek áll rendelkezésére a megfelelő kvantum létrehozásához szükséges energia. Ezért a test csak nagyon kevés rövid hullámhosszú kvantumot bocsát ki. A másik végletet, a nagyon kis energiájú kvantumokat sok elektron ki tudja ugyan sugározni, azonban ezeknek a kvantumoknak olyan kicsi az energiája, hogy még együttesen is csak elhanyagolhatóan csekély a hozzájárulásuk az összes sugárzáshoz. A középső, a test hőmérsékletének megfelelő frekvenciatartományban viszont rengeteg oszcilláló elektron képes az adott kvantum létrehozására, és a sok kvantum együttes energiája látványos sugárzás formájában összegződik.

Planck 1900 decemberében jelentette be ezt a felfedezését - ezt a pillanatot tekintjük a kvantummechanikai forradalom kezdetének.

Maga Planck azonban nem állította, hogy a fény csak kvantumok, vagyis a fény apró részecskéi formájában létezhet. Véleménye szerint az a dolog lényege, hogy az elektromágneses energiát kisugárzó (vagy elnyelő) töltött részecskék valamilyen tulajdonsága lép működésbe, és bár a fény (az elektromágneses sugárzás más fajtáihoz hasonlóan) klasszikus hullámként létezik, ám a töltött részecskék tulajdonságai megakadályozzák a meghatározott mennyiségűtől eltérő nagyságú energiaadag kisugárzását vagy elnyelését.

Noha Planck számításai minden tekintetben helyes választ adtak, amikor a forró testek elektromágneses sugárzásának leírására alkalmazta őket, sokaknak nem tetszett (köztük magának Plancknak sem) a hozzá tartozó értelmezés arra vonatkozóan, mi is történik „valójában” a folyamatok során. Munkája elismeréseképpen Planck csak 1918-ban kapta meg a Nobel-díjat (a sors furcsasága, hogy ő maga soha nem barátkozott meg az új kvantumelmélet fogalmaival, jóllehet 1947-ig élt). A díj odaítélésének időzítése jelentős mértékben összefügg Albert Einstein elméleti munkájával (aki saját munkásságáért 1921-ben kapta meg a Nobel-díjat), és Robert Millikan kísérleteivel, aki viszont 1923-ban vehette át saját Nobel-díját.

Egyedül Einsteinnek volt a XX. század elején elég bátorsága ahhoz, hogy fizikai valóságként fogadja el a Planck-féle kvantumok létezését. Egy 1905-ben publikált cikkében magyarázatot adott arra, miként lökődnek ki egy fémfelületből fény hatására elektronok (vagyis a fotoelektromos hatás néven ismert jelenségre). A jelenséget a fényrészecskék (kvantumok) fémfelületbe ütközésével magyarázta. Minden egyes kvantum meghatározott, a frekvenciájától (a fény színétől) függő mennyiségű energiát szállít. Ezért tiszta, egyszínű (monokromatikus) fényt alkalmazva, a fémfelületből kilökődő elektronok mindegyikének ugyanakkora az energiája. A kísérleti fizikusok számára már 1899 óta értelmezhetetlen rejtélyt jelentett ez a felfedezés, ám Einstein megadta a magyarázatot a kísérletek meglepő eredményére. Einstein tisztában volt felfedezése forradalmi

jelentőségével. Eleinte szinte senki nem vette komolyan az ötletet, ezért még 1911-ben is egy tudományos konferencián, az első úgynevezett Solvay-találkozón a következőket mondta kollégáinak: „Ragaszkodom ennek az elképzelésnek a provizórikus jellegéhez, hiszen úgy tűnik, az nem egyeztethető össze a hullámelmélet kísérletileg igazolt következményeivel.”³⁵ A probléma az volt, hogy Einstein még mindig csak vagy-vagy fogalmakban gondolkodott. Vagy hullám a fény, vagy pedig részecske. A hullám mellett szóló bizonyítékok kizárják a részecske lehetőségét; a részecske melletti bizonyíték viszont nem engedi meg a hullám létezését. Mindkettő egyszerre nem lehet igaz, vagy talán mégis?

Millikan, aki 1868 és 1953 között élt, és az első Solvay-kongresszus idején a Chicagói Egyetemen dolgozott, ugyancsak egyetértett a fenti állítással. Képtelenségnek tartotta azt a feltételezést, mely szerint a fény részecskékből állhat, ezért elhatározta, hogy a fotoelektromos jelenségre vonatkozó, nagyszerűen megtervezett és kivitelezett kísérlettel megcáfolja Einstein állítását. 1915-re azonban korábbi legjobb meggyőződése ellenére be kellett látnia, hogy minden bizonyíték Einstein igaza mellett szól, és a fénykvantumok valóságos, fizikailag létező objektumok. Emellett neki sikerült először pontosan megmérnie a Planck-állandó értékét, továbbá minden korábbinál pontosabban megmérte az elektron töltését. Még senki sem értette a fénykvantum fizikai realitásának igazi jelentőségét, ám a kísérleti bizonyítékokat nem lehetett letagadni, amellet egyszerre csak megindult a témával kapcsolatos kutatások elismeréseképpen - Planckkal kezdve - a Nobel-díjak sorozata. 1923-ra, amikor Millikan megkapta a díjat, a fénykvantumok létezését már egyértelműen bizonyítottnak lehetett tekinteni, ám a részecskének csak 1926-ban adta a foton nevet (a fény görög elnevezése, a photos nyomán) egy Gilbert Lewis nevű, Berkeleyben (Kaliforniában) dolgozó fizikus. A névadás közvetlenül azt követően történt, amikor sikerült újszerű módon leírni a fényrészecskék viselkedését, ami viszont elvezetett magának a kvantummechanikának a megszületéséhez.

Aki megtanította Einsteint megszámolni a fotonokat

Az akkoriban Kelet-Bengáliához tartozó Daccai Egyetemen dolgozó Satyendra Nath Bose indiai fizikus bebizonyította kollégáinak, hogy egy meg egy az nem szükségszerűen kettő, miáltal utat nyitott a kvantummechanika, valamint a fény és az anyag új elmélete felé. Az 1994-es esztendő háromszorosán is évfordulót jelentett Satyendra Bose életét és munkásságát illetően. Calcuttában született, pontosan száz évvel korábban, 1894. január 1-jén, és 80 évvel később, 1974. február 1-jén ugyanott halt meg. Legnagyobb tudományos eredményét az jelentette, amikor az 1920-as évek elején a sugárzás kvantumelméletével kapcsolatban abban az időben létező, szedett-vedett elképzeléseket rendbe szedte, és minden részletet összefogó, egységes matematikai leírást adott a fénykvantumról.

35 Lásd Gribbin: Schrödinger macskája, 81. oldal.

Amikor Planck a XIX. század végén bevezette a kvantálás fogalmát az anyag és a sugárzás kölcsönhatásának tárgyalásába, akkor még csak ad hoc módon, kizárólag a feketetest-sugárzás viselkedésének magyarázatára használta az ötletet. Bár Albert Einstein 1905-ben felvetette, hogy magának a fénynek is kvantálnak kell lennie (és Millikan kísérlete később bebizonyította e feltevés helyességét), az 1920-as évek elején sok fizikus - ha nem a legtöbb - nem „hitte őszintén”, hogy a fény részecskék formájában létezhet. Nem véletlen, hogy a fény részecskéjének csak 1926-ban adták a „foton” nevet, miután Bose biztos matematikai alapokra helyezte a fény kvantumelméletét.

Planck úgy oldotta meg a feketetest-sugárzás problémáját, hogy az elektromágneses energiát (matematikailag) kis darabokra vágta. Hangsúlyozni szeretném azonban, hogy Planck fel sem vetette a sugárzás ilyen egységeinek bármiféle fizikai jelentését, csupán azon gondolkodott, mi történhet a sugárzó testek belsejében, ami az energiát csak bizonyos nagyságú adagokban engedi kisugározni. Hasonló a helyzet ahhoz, amikor a csapból egy lassan megtelő edénybe csöpög a víz. A csap mögött, a csövet amorf folyadékként folytonosan kitölti a víz, és az edényt ugyancsak amorf folyadék tölti ki. A szivárgó csap fizikai tulajdonságai azonban megszabják, hogy a víz csak meghatározott méretű cseppek formájában tud a csaptól a tálig eljutni.

Akárcsak a csöpögő csap példája esetében, a feketetest-sugárzás Planck-féle leírása csupán a sugárzás kibocsátásának (vagy elnyelésének) a mechanizmusára vonatkozott, ehhez tételezte fel a meghatározott méretű „cseppek” létezését. Fel sem merült az a lehetőség - sem maga Planck, sem mások részéről -, hogy a fény vagy az elektromágneses sugárzás más fajtái valóban kis csomók, azaz kvantumok formájában létezne. Egy 1931-ben R. V. Woodnak írott levelében Planck emlékeztet arra, hogy „(a kvantálás) tisztán formai feltételezés volt, és én valóban nem töprengtem semmi máson, csak azon, hogy kerül, amibe kerül, valamilyen pozitív eredményre kell jutnom”.³⁶ Az 1920-as évek elején szinte mindenki tudta, hogy a „fénykvantum” képes megmagyarázni az anyag és a fény közötti kölcsönhatás számos, egyébként rejtélyes tulajdonságát, de szinte senki sem tekintette ezt többnek pusztán matematikai fogásnál. Még mindig arra gondoltak, hogy a fény valóságos hullám, amint azt a Maxwell-egyenletek leírják.

Volt azonban egy kivétel. Indiában a fizikusok komolyan vették a fénykvantum fogalmát. Úttörő asztrofizikusuk, Meghnad Saha a fénykvantum segítségével írta le a sugárnyomás jelenségét egy az Astrophysical Journalban 1919-ben megjelent cikkében. Ezt követően Boséval közösen elkészítették Einstein általános relativitáselméletéről szóló cikkének egyik legkorábbi angol fordítását. Ennek során megvitatták a kérdést, aminek eredményeképpen Bosében tudatosult, hogy szükség van a Planck-féle feketetest-sugárzási „törvény” megfelelő, azoktól a következtetlenségektől mentes levezetésére, amelyek elkerülhetetlen következményei voltak Planck módszerének; ő ugyanis megpróbálta a kvantummechanika lényegéből adódó diszkrét változást beültetni a folytonos hullámok klasszikus keretébe. Bose megállapította, hogy ez a cél

36 Idézi Dipankar Home, New Scientist, 1994. január 8.

elérhető, de csak akkor, ha a fény részecskéi a megszokottól eltérő statisztikai törvényszerűségeknek engedelmessékednek.

Bose munkásságát illetően az a különös, hogy írásaiban nyoma sincs az elektromágneses sugárzás leírásának a hullámtan vagy az elektromágnesség fogalmaival. A fotonokat egy üreget kitöltő, részecskékből álló gáznak tekintette, amelyek a hétköznapi statisztikából ismerttől eltérő statisztikai törvényeknek engedelmessékednek. Ebből a feltevésből kiindulva jutott el a Planck-egyenletig.

Legegyszerűbb módon úgy alkothatunk magunknak képet a lejátszódó folyamatokról, ha két, újonnan vert, azonos értékű pénzérmét képzelünk magunk elé. Ha mindkét érmét feldobjuk, három lehetséges eredményt kaphatunk. Kaphatunk két fejet, két írást, vagy egy fejet és egy írást. Első pillanatban azt gondolhatjuk, hogy a dobás három kimenetele egyformán valószínű - vagyis például $1/3$ a valószínűsége a fej-írás kombinációnak. Kis gondolkodás után azonban rájöhetünk, hogy nem egészen ez a helyzet.

Tételezzük fel, hogy valamiképpen megjelöljük az egyik érmét, tehát a két pénzdarab megkülönböztethetővé válik (vagy használjunk két különböző címletű érmét). Ebben az esetben könnyű belátni, hogy a fej-fej, illetve az írás-írás kombinációk csak egyféleképpen fordulhatnak elő, a fej-írás eredmény viszont kétféleképpen jöhet ki (gondoljunk a fej-írás, illetve írás- fej lehetőségre). Bármelyik érme mutathat „fejet”, ha a másik írást ad. Akkor járunk el tehát helyesen, ha két pénzérme feldobása esetén a lehetséges esetek számát négynek tekintjük, nevezetesen: fej-fej, írás írás, fej-írás és írás-fej. Bármely eredmény valószínűsége $1/4$, nem pedig $1/3$. És mivel a fej-írás kombináció kétféleképpen fordulhat elő, ennek az előfordulási valószínűsége $1/2$ lesz (kétszer $1/4$), tehát 50 százalék. A lényeg az, hogy ha az érmék megkülönböztethetetlenek, akkor a fej-írás kombináció nem különböztethető meg az írás-fejtől.

Ha azonban a részecskék valóban megkülönböztethetők egymástól (nem azért, mert megjelöltük az érméket, hanem belső tulajdonságaik miatt), akkor a statisztika más eredményt ad. Akkor a pénzfeldobási kísérletnek valóban négy, egymástól különböző, de egyformán valószínű eredménye lehet. Ne törődjünk a részletekkel, a lényeg az, hogy ebből az egyszerű példából is látható: más-más eredményt kapunk attól függően, hogy a részecskék megkülönböztethetők vagy sem. Másként fogalmazva azt is mondhatjuk, hogy a nagyszámú részecske viselkedésének leírására attól függően kell egyik vagy másik statisztikát használnunk, hogy milyen részecskéről van szó.

Bose megállapította, hogy Planck formuláját abban az esetben tudja levezetni, ha a fotonokat egy bizonyos statisztikának engedelmessékedő részecskének tételezi fel. A fotonok megkülönböztethetetlenek egymástól (bár a helyzet nem ilyen egyszerű, de nem szeretném az összes bonyodalmat ismertetni), és a fotonok világában a fotonok statisztikus viselkedése befolyásolja, milyen közöttük az energia eloszlása, azaz miként oszlanak el a fotonok a különböző energiaállapotok között.

Vannak azonban a fotonok viselkedésének további furcsaságai is. A fotonok nem maradnak meg. Újabb és újabb fotonok keletkeznek például, amikor felkapcsoljuk a lámpát, és persze óriási mennyiségben áramlanak ki a Napból és más csillagokból. Eközben a fotonokat folyamatosan elnyeli a szoba fala, a szemünk, a Föld felszíne és így tovább. Ez a két folyamat azonban nincs egyensúlyban egymással, vagyis a Világegyetemben jelen lévő fotonok száma folytonosan változik.

Ez merőben eltér más elemi részecskék, például az elektronok viselkedésétől. Elektronok nem keletkezhetnek és nem semmisülhetnek meg, kivéve azt az egészen speciális körülményt, amikor az elektron „antirészecskéjével”, a pozitronnal együtt keletkezik vagy szétsugárzódik. A Világegyetemben található elektronok száma tehát állandó (a pozitronokat természetesen ennél a létszámmellenőrzésnél mínusz egy elektronnként kell figyelembe venni).

Kiderült, hogy más statisztika vonatkozik egyes részecskékre, például az elektronokra. Ezt a kvantumfizikusok Fermi-Dirac-statisztikának nevezik, az olasz Enrico Fermi és az angol Paul Dirac tiszteletére. A másik, Bose-Einstein-statisztikának nevezett szabálynak engedelmeskedő részecskéket, például a fotont, együttesen „bozonoknak” nevezik, míg a Fermi-Dirac-statisztikának engedelmeskedő részecskék gyűjtőneve a „fermion”.

De miért Bose-Einstein-statisztika, és miért nem csak Bose-statisztika? Bose 1924-ben cikket írt felfedezéseiről a Philosophical Magaziné című folyóiratnak, de nem kapott választ. Ezért ugyanazon év júniusában elküldte a cikk egy példányát Einsteinnek. Arra kérte Einsteint, hogy olvassa el a kéziratot (a cikket angolul írta), és ha értelmét látja, továbbítsa a Zeitschrift für Physik szerkesztőségének. Einsteinnek annyira megtetszett a dolgozat, hogy ő maga fordította le németre, és saját ajánlásával küldte el a folyóiratnak. Természetesen a Zeitschrift szerkesztősége minden cikket szívesen fogadott, amelyet Einstein ajánlott, így a cikk 1924 nyarán meg is jelent a lapban.

A dolog jelentősége félelmetes volt. Bose egyszerűen abból a feltevésből vezette le a feketetest elektromágneses sugárzásának egyenletét, miszerint a fotonok valóságos részecskék, amelyek kvantumgázként viselkednek, és egy bizonyos statisztikának engedelmeskednek. A feketetest sugárzási törvényének Bose-féle levezetésében nyoma sincs az elektromágneses hullámoknak. Einstein is magáévá tette az új statisztika gondolatát, és három cikkében más problémák megoldására alkalmazta azt. Ez a három cikk volt egyébként Einstein utolsó jelentős hozzájárulása a kvantummechanikához. Az új statisztikát használva leírta a gázok viselkedését különböző körülmények között (a statisztika bizonyos esetekben megmaradó objektumokra is alkalmazható), és egyebek között kimutatta, hogy amint a (hagyományosan hullámnak tekintett) fény a részecskékre vonatkozó fogalmak segítségével is magyarázható, ugyanúgy megfelelő körülmények közt a molekuláknak (tehát bizonyos részecskéknak) hullámként kell viselkedniük. Ugyanakkor, amikor Einstein 1924 végén ezen felfedezésének jelentőségén töprengett, Paul Langevin elküldte neki tanítványa, Louis de Broglie doktori értekezését. A dolgozatban de Broglie azt a merésznek

tűnő kijelentést tette, hogy az elemi részecskék, például az elektronok hullámként viselkedhetnek. Langevin nem tudta eldönteni, hogy zseniális ötletről vagy tökéletes örültségről van-e szó. „Azt hiszem”, írta Einstein, „több van a dologban puszta analógiánál.” De Broglie munkáját ennek a jóváhagyó nyilatkozatnak köszönhetően komolyan vették. Az ötletet Erwin Schrödinger is magáévá tette, és azt a kvantumvilág egyik teljes értékű leírásává, az úgynevezett hullámmechanikává fejlesztette tovább. Később megjegyezte, hogy „a hullámmechanika a statisztikából született”. Egy 1926 áprilisában Einsteinnek írott levelében hozzátette: „Talán az egész ügy el sem kezdődött volna, sem most, sem később (legalábbis én nem kezdtem volna vele foglalkozni), ha az Ön második cikke a Bose-gázokról nem irányítja a figyelmemet de Broglie ötletének jelentőségére.”³⁷

Maga Bose azonban nem kapcsolódott be a kvantummechanika elkövetkező néhány évben kibontakozó, izgalmas fejlődésébe. Ehelyett inkább visszatért korábbi érdeklődési területére, az általános relativitáselmülethez. Einsteint követte abban a később zsákutcának bizonyult, korát megelőző kutatásban, amelyben az egységes térelméletet szerették volna megalkotni. Miután Einstein 1955-ben meghalt, ez a kutatási vonal kifulladt, és Bose eredményei is jórészt feledésbe merültek. Élete utolsó húsz évében a tudomány népszerűsítésével foglalkozott, tanított, és megpróbálta fejleszteni az átlagemberek tudományos ismereteit. „Valójában többé már nem voltam jelen a tudományos kutatásban”, jegyezte meg élete vége felé. „Olyan voltam, mint egy üstökös, amelyik egyszer feltűnik, azután nem tér vissza soha többé.” Ám ennek az üstökösnek a perzselő fénye az 1920-as években az egész fizikai gondolkodásmódot alapvetően megváltoztatta, és merőben új útra terelte a fizika fejlődését.

A foton névadása után még több mint 20 évre volt szükség ahhoz, hogy a fizikusok megalkossák a kvantált elektromágneses tér kielégítő elméletét. Megérte azonban a várakozás, mert a végül kvantumelektrodinamika (QED) néven létrejött elmélet minden idők legsikeresebb és legpontosabb tudományos elmélete lett. Az elmélet leírja az elektronok és az elektromágneses sugárzás kölcsönhatását, továbbá a gravitáció és az atommag viselkedését kivéve, a fizikai világ minden jelenségére magyarázatot ad. Az elméletet különféle kísérletekkel hihetetlen pontossággal ellenőrizték.

A fény és az anyag különös elmélete

Ennek a szakasznak a címét Richard Feynman ragyogó, QED című könyvének alcíméből kölcsönöztem. Feynman, aki 1918-ban született és 1988-ban halt meg, korosztálya legjelentősebb elméleti fizikusa volt. Számos tudományos eredmény fűződik a nevéhez, azonkívül megírt egy nagy népszerűségnek örvendő fizikai kézikönyvet, több kötetre való, ugyancsak sikerkönyvnek számító önéletrajzi

37 Az ebben és a következő bekezdésben szereplő idézetek forrása: Dipankar Home: New Scientist, 1994. január 8.

visszaemlékezést, és tudománynépszerűsítő tanárként is nagyra tartották. Élete vége felé ő volt a világ egyik leghíresebb természettudósa (és minden bizonnyal a természettudományban a leghíresebb „egyéniség”). Számtalan tudományos eredménye közül a legjelentősebb³⁸ vitathatatlanul a kvantumelektrodinamika, amit ő „a fény és az anyag különös elméletének” nevezett.

A kvantumelektrodinamika azért olyan fontos, mert a minket körülvevő világban szinte mindent az elektronok egymással és az elektromágneses sugárzással való kölcsönhatása határoz meg. A világ, és benne mi magunk is, atomokból épül fel, az atomokban a tömör atommagot elektronok felhője veszi körül. Az elektronok jelentik az atomok látható „arcát”, az atomok és a molekulák közötti kölcsönhatások lényegében az elektronfelhők közötti kölcsönhatások. Az elektronok fotonok cseréje révén lépnek egymással kölcsönhatásba. Az egyik elektron kibocsát egy fotont, miközben valamiképpen „visszalökődik”, a másik elektron pedig elnyeli a fotont, ami kis „oldalra rúgásnak” felel meg.

Minden, ami csak az atomok kölcsönhatása során történik, megmagyarázható ezekkel a fogalmakkal.

Az egész kémiát a kvantumfizika, és azon belül a kvantumelektrodinamika magyarázza meg. Az élet a bonyolult molekulák, például a fehérjék és a DNS viselkedésétől függ, ami ugyancsak kémia, tehát végső soron ugyancsak az elektronok kvantumtulajdonságaitól függ. Az elektronok elhelyezkedése az atommag körüli elektronfelhőben a negatív töltésű elektron és a pozitív töltésű atommag közötti kölcsönhatáson múlik - ezt szintén a kvantumelektrodinamika törvényei szabályozzák. Az olyan jelenségeket, mint például a radioaktív bomlás, ahol maguk az atommagok is megváltoznak a folyamatban, nem képes a kvantumelektrodinamika megmagyarázni, ehhez más elméletre van szükség. Ám az atommagok belsejében végbemenő folyamatokról a jelenlegi legpontosabb ismereteink olyan elméleteken alapulnak, amelyeket a kvantumelektrodinamika sikerein felbuzdulva, szándékosan arról mintáztak, és amelyek önmagukban ugyancsak sikeresek, bár nem annyira, mint maga a kvantumelektrodinamika.

Különböző módszerekkel lehet elmagyarázni, miről is szól az egész kvantumelektrodinamika, de nekem Feynman megközelítése a legszimpatikusabb. Ő a részecskéket - a fotonokat és az elektronokat - valószínűségi hullámokkal írja le. Ezek a valószínűségek elárulják, hol található az illető részecske a legnagyobb valószínűséggel, de amikor valóban megtaláljuk a részecskét (mint a kétréses kísérlet elektronokkal végrehajtott változatában), akkor valóban részecskékként találjuk meg őket. Mindössze három dolog számít,

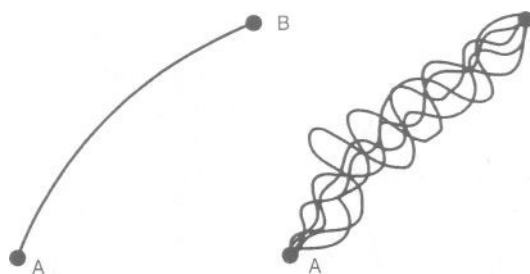
38 A legjelentősebb, legalábbis tudományos értelemben. Amikor egyik kollégám, Marcus Chown a Kaliforniai Műszaki Egyetemen (a CalTechen) doktorandusz hallgató volt, megkérte Feynmant, magyarázza el édesanyjának (mármint Chown mamájának), miért fontos a fizika. Feynman levélben írt a hölgynek, hogy kellő megvilágításba helyezze a dolgok jelentőségét. Arra kérte őt, ne nyugtalankodjék amiatt, amivel a fia foglalkozik. „A fizika nem fontos, csak a szeretet”, írta levelében Feynman.

amikor a fény és az anyag kölcsönhatásáról van szó, mondja Feynman. Az egyik annak a valószínűsége, hogy a foton az egyik helyről egy másikra megy. A második annak a valószínűsége, hogy egy elektron az egyik helyről egy másikra megy. Végül a harmadik annak a valószínűsége, hogy egy elektron elnyel vagy kibocsát egy fotont. Ha kiszámítjuk egy adott eseményben részt vevő összes elektron és foton esetében ezt a három valószínűséget, akkor pontosan meg tudjuk mondani, mi történik az elektronok és a fotonok kölcsönhatásakor.

Bonyolult rendszerek esetében ez óriási mennyiségű számítást igényel, bár az egyes számítások önmagukban nagyon egyszerűek. Ezért a pontos számításokat csak viszonylag egyszerű, legfeljebb néhány elektront és néhány fotont tartalmazó rendszerekre lehet elvégezni. Mindamellett, ezek a pontosan végigszámolt példák segítenek felállítani a bonyolultabb rendszerekre vonatkozó (de azért még meglehetősen pontos), általános közelítéseket.

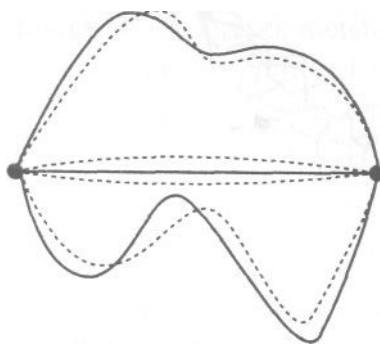
A számítás részben azért olyan bonyolult, mert amikor minden cifrázás nélkül „a foton (vagy elektron) egyik helyről a másikra történő elmozdulásának valószínűségéről” beszélek, akkor az önök tudatában szinte magától értetődően egy, az A pontból a B pontba valamilyen sima íven mozgó részecske képe jelenik meg. Ez a kép azonban hibás! Feynman egyik kulcsfontosságú eredménye a kvantumelektrodinamika kidolgozása során éppen annak felismerése volt, hogy ilyenkor az A és B közötti összes lehetséges útvonalat figyelembe kell venni. A kétréses kísérletnél már láttuk, miként szerez látszólag tudomást a kísérleti elrendezésen áthaladó egyetlen foton mindkét rés létezéséről, mintha egyszerre mind a két lehetséges útvonalat bejárta volna. Feynman azonban ennél is tovább megy. Amikor a részecske az egyik helyről a másikra megy, mondja, akkor minden lehetséges útvonalat számításba vesz. Nemcsak az egyenes útvonalakat, vagy az enyhén ívelt pályákat, hanem a bonyolult, összevissza kanyargó utakat is, amit csak el tudunk képzelni.

A gondolat első pillanatban nevetségesnek hangzik, ám Feynman tárgyalásmódja megmutatja, hogy egyáltalán nem az, sőt (szinte) még a józan ésszel is összeegyeztethető. A kétréses kísérletben annak a valószínűsége, hogy a rések mögötti ernyő egy adott pontján világos foltot kapunk, kiszámítható, csak össze kell adni a fény egyik, illetve másik lyukon történő áthaladásának a valószínűségét. Ez valóban szinte teljesen megfelel a hétköznapi gondolkodásunknak, mindaddig, amíg nem foglalkozunk a fény részecsketermészetével. Tételezzük azonban fel, hogy az átlátszatlan falon nem két, hanem négy rést vágunk.



7. ábra A klasszikus fizika - Isaac Newton fizikája - szerint a részecske egyetlen pályát jár be A-tól B-ig. A kvantummechanika Richard Feynman-féle változata szerint az A és B közötti összes lehetséges útvonal hatását figyelembe kell venni, és mindet össze kell adni - nemcsak a rajzon ábrázolt néhány útvonalat, hanem szó szerint az összes lehetségeset. Ez a „történetek összegzése” (vagy „pályaintegrál”) megközelítés az egyik lehetőség annak megértésére, miként tud egyetlen elektron a kétréses kísérletben egyidejűleg mindkét résen átmenni, és utána önmagával interferálni.

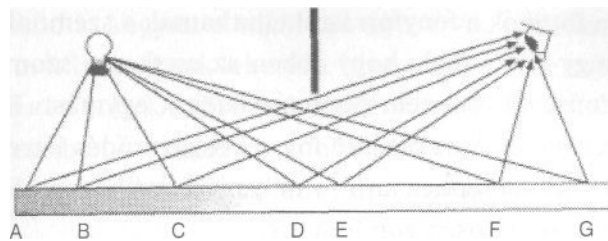
Ezután össze kellene adnunk a négy csoport valószínűséget. Nyolc lyuk esetén nyolcszor rengeteg valószínűséget kell összegezni, és így tovább. Ha az átlátszatlan ernyőbe milliónyi, hajszálvékony rést vágunk, akkor elvben legalábbis továbbra is ki tudjuk számítani a távoli ernyő bármely pontjában a fényességet, de ehhez a millió különböző útvonal összes valószínűségét kellene összegezni („integrálni”). Addigra azonban már több lenne a lyuk az ernyőn, mint a „nem lyuk”. De miért kellene itt abbahagynunk? Képzeljük el, amint az árnyékoló ernyőn oly mértékben elszaporodnak a rések, hogy végül már átfedik egymást, tehát nem is marad átlátszatlan része a lapnak. Feynman rájött, hogy ha nincs átlátszatlan ernyő, akkor a fényforrás és a távoli ernyő közötti összes lehetséges útvonalra összegezni kell a valószínűségeket, ami a kísérleti berendezésben egyáltalán létrejöhet. A bonyolultabb utakhoz tartozó valószínűségek nagyon kicsik, és általában a számítás során ki is ejtik egymást. A hatásuk azonban jelen van, amint az a fény tükréről történő visszaverődésére adott magyarázatából is kiderül.



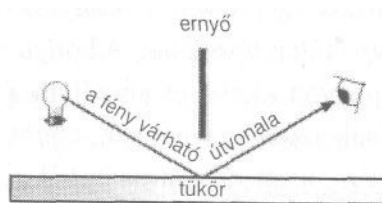
8. ábra Feynman kvantummechanikai tárgyalásmódja a fényre is érvényes. A fény valójában nem kizárólag egyenes vonalak mentén terjed, hanem a fényforrás és a

megfigyelő között minden lehetséges útvonalat bejár. Ám amikor a „történeteket” összegezzük, mind kiejtik egymást, kivéve azokat, amelyek az egyenes vonal közelébe esnek.

Az iskolában egészen biztosan megtanultunk egyvalamit: a tükörről a fény úgy verődik vissza, hogy a beeső és a kilépő fénysugár azonos szöget zár be a tükör felületével. Az állítást könnyen ellenőrizhetjük, ha ferdén ránézünk egy tükörre, és megfigyeljük, mely tárgyak képét látjuk benne. Azt is tanultuk az iskolában, hogy a fény azon az úton halad, amelynek befutásához a legrövidebb időre van szüksége. Figyelembe véve, hogy a fénysugár nem közvetlenül jut a fényforrásból a szemünkbe, hanem közben a tükörről visszaverődik, kimutatható, hogy valóban az egyenlő szögű visszaverődés adja azt az útvonalat, amelyen a visszaverődő fénysugár a fényforrástól a szemünkig a legrövidebb utat teszi meg, ennek megfelelően természetesen ezen az úton tart a legrövidebb ideig a fény terjedése. Bizonyára meglepődnénk, ha azt hallanánk, hogy a tárgy fénye eljut a tükör felületének minden pontjába, és onnan a szemünkbe. Ezek a tükör különböző pontjaiból a legkülönbözőbb szögekben érkező sugarak összegeződnek, és egyesült erővel létrehozzák az általunk látott képet. Nos, kapaszkodjanak meg - pontosan ez történik, legalábbis a kvantumfizika törvényei szerint.



9. ábra A klasszikus fizika szerint a tükör egyenes vonalban veri vissza a fényt, mégpedig úgy, hogy a beesési és a kilépési szög egyenlő.



10. ábra Feynman rájött, hogy bár a történetek összegzése során az azonos szögű visszaverődések részesülnek előnyben, minden más irányú visszaverődés is fontos. A fény a tükör minden pontjából visszaverődik, a legkülönbözőbb szögekben. Ebben az esetben azonban a tükör szomszédos pontjaiból visszaverődő sugarak kioltják egymást, kivételt képeznek a klasszikushoz közeli útvonalon haladó sugarak.

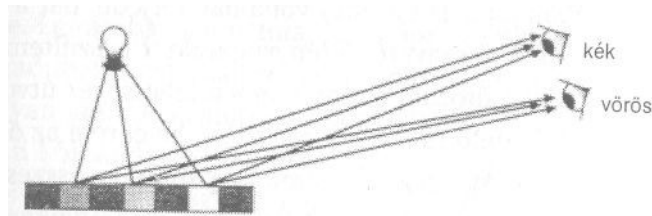
Egyik szélsőséges esetben képzeljük el, amint a tárgy fénye merőlegesen éri el a tükröt, de onnan ennél kisebb szögben verődik vissza, és így jut a szemünkbe. Másik lehetőségként képzeljünk el egy olyan fénysugarat, amelyik kis szögben, de a szemünkhöz közel éri el a tükrő felületét, onnan meredeken verődik vissza, és így mégiscsak a szemünkbe érkezik. Az is előfordulhatna, hogy a fénysugár az ellenkező irányban haladva, tőlünk távolodva éri el a tükröt, majd nagyon éles szögben visszaverődve mégiscsak a szemünkbe jut. A felsorolt, és a további elképzelhető esetek valójában mind megtörténnek. Mindezt azért nem vesszük észre, mert a legrövidebb út közelében haladó útvonalak egyrészt sokkal valószínűbbek a többinél, másrészt erősítik egymást, ezért a fény legrövidebb úton haladása sokkal nagyobb valószínűséggel valósul meg, mint bármilyen más pálya. A valószínűségek azonban csak a „klasszikus pálya” közelében adódnak össze és erősítik egymást. Amint Feynman megjegyzi: „ahol az idő legrövidebb, egyúttal ott a legkisebb az egymással szomszédos útvonalak közötti időkülönbség”,³⁹ ezért itt adódnak össze a valószínűségek. A tükrő szélén, ahol a fotonoknak örületes szögekben kell visszaverődniük, hogy a szemünkbe jussanak, sokkal nagyobb az időkülönbség a „szomszédos” útvonalak között, amelyeken a fotonok a fényforrástól eljuthatnak a szemünkig. A valószínűségek úgy működnek, hogy ebben az esetben a szomszédos pályák valószínűségei csaknem pontosan kiejtik egymást. Ezért végső soron a tükrőnek csak az a része fog a visszaverődés létrehozásában valóban lényeges szerephez jutni, amely részére a hagyományos észjárásunk szerint ösztönösen gondolnánk.

De várjunk csak! Ezzel még nincs vége a történetnek. Egy egyszerű kísérlettel igazolni lehet, hogy a fotonok valójában a tükrő legkülső részéről is érkeznek a szemünkbe, jóllehet ott a valószínűségek kiejtik egymást. Gondolatban fedjük le a szélének egy kis darabkája kivételével az egész tükröt valamilyen fekete textillel, így az a letakart részeket egyáltalán nem veri vissza a fényt. Nos, hiába is keresnénk a képet ott, ahová a fénysugaraknak meg kellene érkezniük, ha át tudnának hatolni a takarón, és a tükrőről mégiscsak visszaverődve eljutnának a szemünkbe - semmit sem fogunk látni, mert a takaró elnyelte a fényt. Van azonban egy trükk, amelynek segítségével a tükrő szélét használva, a visszaverődéshez „rossz” irányban haladó sugarakkal mégis létre lehet hozni a képet.

Bár a tükrő peremvidékének szomszédos területeiről visszaverődő sugarak kioltják egymást, megtalálhatjuk a tükrőnek azokat a sávjait, ahol a valószínűségek összeadódnak. A problémát csak az jelenti, hogy ezeket a területeket a tükrő olyan sávjai választják el egymástól, ahol a valószínűségek ellentétesen hatnak. Összességében a valószínűségek kiejtik egymást, de megtalálhatók az egymást erősítő valószínűségű sávok, amelyeket az ellentétes valószínűségűek választanak el egymástól. Nincs más dolgunk, csak fektessünk további textilcsíkokat a „rossz” valószínűségű helyekre, így ugyan már csak a tükrő szélének fele fog látszani, azonban az onnan visszaverődő sugarak valószínűségei erősítik egymást.

39 Feynman: QED, 45. oldal.

Az, hogy milyen távolságra kell elhelyeznünk egymástól a takaró csíkokat, a használt fény hullámhosszától függ (szép példa a hullámrészecske dualizmusra, hiszen a fényt ezúttal fotonok áramaként tárgyaltuk!), ezért legcélszerűbb a kísérletet egyszínű (monokromatikus) fénnel végezni, ha tiszta képet akarunk kapni. Ha elvégezzük a kísérletet, az működik. Vegyük a tükörnek egy, a visszaverődéshez rossz részét, ahol már bizonyosak lehetünk benne, hogy nem kapunk tükörképet. Ha ezután ennek a tükörnek a felét a megfelelő módon letakarjuk (amely esetben a klasszikus gondolkodásmódunk szerint tovább csökken a kép megpillantásának az esélye), megjelenik a tükörkép.



11. ábra Akkor láthatjuk a vad szögekben visszaverődő fénysugarakat, ha a tükör párhuzamos csíkjait letakarjuk. Ez azt jelenti, hogy a többit „kioltó” fénysugarakat sikerült távol tartani. Ha tehát a tükör felét letakarjuk, több visszaverődést kapunk! A különböző színű fénysugarak kissé eltérő szögben verődnek vissza a diffrakciós rácsról, ami szivárványszínű hatást eredményez. A trükk csak nagyon keskeny csíkok esetén, elsötétített helyiségben működik, de ha egy CD-t erős fénybe tartunk, akkor magunk is könnyen megfigyelhetjük a jelenséget.

Az ilyen visszaverő csíkokból álló rendszert diffrakciós rácsnak nevezzük (mert a visszaverődés ebben az esetben a fényhullámok diffrakciójával is magyarázható); ilyen eszközt bizonyára már mindenki számos alkalommal látott működés közben. Az egymástól meghatározott távolságban elhelyezkedő, visszaverő csíkokból álló „rács” a különböző színű fénysugarakat kicsit eltérő szögben veri vissza, ezért a fehér fény szivárványszerű spektrumra bomlik. Az így kapott színek hasonló ahhoz, amilyent Newton állított elő, amikor a napfényt az üvegprizmára ejtette. Pontosan ez a jelenség idézi elő a szivárványszínű mintázatot, amikor egy CD-t a fénybe tartunk. Ha a lemezt a klasszikus visszaverődési képnek megfelelő szögbe fordítjuk, akkor csillogóan fényes felületén megpillanthatjuk a fényforrás közönséges tükörképét. Ha kicsit jobban megdöntjük úgy, hogy ez a kép eltűnjék, akkor továbbra is láthatjuk a CD tükröző felületét borító párhuzamos barázdákról a legörültebb szögekben visszaverődő fotonok alkotta szivárványos mintázatot. Valójában a CD „rossz” részeiről visszaverődő fény által létrehozott színes sávokat még akkor is láthatjuk, amikor közben a „normális” kép is látszik. Saját szemünkkel, otthoni magányunkban is láthatjuk tehát a kvantumelektrodinamika működését.

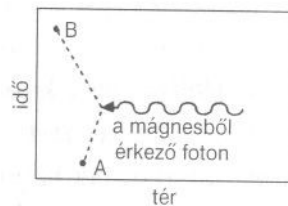
Ebben a példában csak az egyenes vonalban terjedő, bár a tükörről különböző szögekben visszaverődő fénysugarakról beszéltem. Valójában az elmélet teljes

változata a fény minden lehetséges útvonalát figyelembe veszi a kiinduló és a végpont között, beleértve az őrült, cikkcakkos útvonalakat is. Minthogy a számítások során az összes lehetséges útvonalra összegezni (integrálni) kell, a kvantumfizikának ezt a megközelítésmódját gyakran „pályaintegrál” (vagy „történelemösszegzési”) módszernek nevezzük. Szerencsére a valószínűségek mindig úgy összegeződnek, mintha a fény egyenes vonalban terjedne. Ám a teljes kioltás csak a „klasszikus” egyenes vonaltól távol következik be. „Valójában a fény nem csak egyenes vonalban terjed”, mondja Feynman, „hanem valahogy »érzi« maga körül a szomszédos pályákat, miközben csak a környező tér kicsiny magját használja fel.”⁴⁰

Az összeadódó valószínűségek hasonló leírásával az optika minden jelenségét megmagyarázhatjuk, beleértve a lencsék működését, a fény törését és lelassulását, amikor a fény a levegőből a vízbe lép, a kétréses kísérletet és Poisson fényes foltját. A kvantumelektrodinamika diadala azonban akkor válik igazán nyilvánvalóvá, ha észrevesszük, milyen pontosan írja le az elmélet a fotonok és az elektronok kölcsönhatását.

A kvantumelektrodinamika diadala

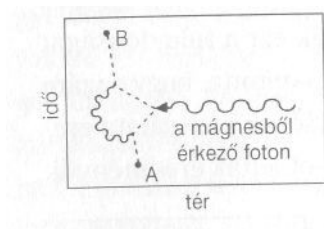
A legegyszerűbb kölcsönhatás az, amikor az egyik pontból egy másikba tartó elektron útközben kibocsát vagy elnyel egy fotont, és a kölcsönhatás következményeképpen egy harmadik pontba jut. Magát a fotont esetleg egy másik pályán mozgó, másik elektron bocsátotta ki vagy nyeli el. Ám az is lehet, hogy a foton egy rúd-mágnes mágneses terével áll kapcsolatban. Paul Dirac, a kvantummechanika egyik úttörője már 1929-ben kidolgozta az elektronok és a fotonok kölcsönhatásának egy leírását, amely a speciális relativitáselméletet teljes mértékben, ám a kvantummechanika követelményeit csak részben vette figyelembe. Leírásában Dirac tulajdonképpen az elektron és a foton közötti kölcsönhatás valószínűségeit számította ki, és ezeket felhasználta egy olyan szám kiszámítására, amelyik az elektron és a mágneses tér közötti kölcsönhatás mértéke (az elektronnak ezt a tulajdonságát mágneses momentumnak nevezzük). Dirac megállapította, hogy e szám értékének 1 -nek kell lennie, bizonyos mértékegységek használata esetén. A kísérletek azonban erre a számra $1,00116$ -ot adtak eredményül.



12. ábra Paul Dirac eredeti számítása az elektron mágneses momentumára az egy fotont tartalmazó, egyszerű kölcsönhatáson alapul.

A különbség ugyan kicsiny, de ahhoz mégis elegendő, hogy jelezze az elmélet hiányosságát. 1948-ban Julian Schwinger, aki akkor a Harvard Egyetemen dolgozott, rájött, miként lehet tökéletesíteni Dirac módszerét. Schwinger (aki véletlenül pontosan ugyanabban az évben - 1918-ban, és ugyanabban a városban - New Yorkban - született, mint Feynman) rájött, hogy miközben az elektron az egyik helyről a másikra tart, semmi sem akadályozza meg abban, hogy esetleg maga is kibocsásson egy fotont, majd ugyanezt a fotont elnyelje. Ez elbonyolítja a valószínűségek számítását, ám ennek eredményeképpen az elektron mágneses momentuma egy hajszálnyival nagyobbak adódik. Nem pontosan annyival, hogy az eredmény tökéletesen megfeleljen a kísérletekben kapott értéknek, de legalább egy lépést jelentett a helyes irányban.

Amikor a fizikusok rájöttek, mi a helyzet, nyilvánvalóvá vált, mit kell tenniük, ha még pontosabban akarják kiszámítani az elektron mágneses momentumát. Ehhez azonban rengeteg, kínkeserves számolásra volt szükség. Először tekintsük azt a helyzetet, amikor a magányos elektron csupán egyetlen, a mágneses térből eredő fotonnal lép kölcsönhatásba, de közben két saját fotont bocsát ki, majd egyiket a másik után elnyeli. Figyelembe kell venni az összes lehetséges módot, ahogy ez lejátszódhat, majd összegezni kell a valószínűségeket. A helyzet olyan bonyolult, hogy két évig tartott a valószínűségek kiszámítása és összegzése, ám az eredmény még az előzőnél is pontosabban egyezett a kísérleti értékkel.



13. ábra Az elektron mágneses momentumának pontosabb kiszámításához figyelembe kell venni azt a lehetőséget is, hogy az elektron közben kibocsáthat, majd újra elnyelhet egy fotont. A számítások egyre pontosabb eredményt adnak, ha egyre több fotont veszünk figyelembe a hurokban.

Az 1980-as évek közepére a számításokat már a három „extra” foton esetére is kiterjesztették. Minél bonyolultabb helyzetet képzelünk el, annál kisebb lesz az előzőhöz képest a valószínűsége, és így kisebb korrekciót jelent a számítás végeredményén (ám minden egyes újabb lépést sokkal nehezebb kiszámítani az azt megelőzőnél). Ezen a szinten a mágneses momentum elméleti úton kiszámított értéke már 1,00115965246 volt, az utolsó két jegyben 20 bizonytalansággal. Ugyanabban az évtizedben a kísérletek is tökéletesedtek, és a korábbinál pontosabb eredményt adtak, éspedig 1,00115965221-et, az utolsó jegyben 4 bizonytalansággal. Ennek a számnak a pontossága akkora, mintha a

Los Angeles és New York közötti, több mint 5000 km-es távolságot egy emberi hajszál vastagságának a pontosságával tudnánk megmérni. A két szám közötti egyezés egyúttal a kvantumelektrodinamika pontosságát is jelzi - ez minden idők legpontosabb elmélete, ha az előrejelzések és kísérleti ellenőrzésük pontosságát vesszük alapul. Talán van, aki mindezt örütségnek tartja; esetleg van, akinek nem szimpatikus az elmélet. Azt azonban nem lehet vitatni, hogy működik - vagyis a világ jelenségei valóban ennek megfelelően játszódnak le. Feynman szavaival: „a Természet óriási változatosságának csaknem minden részlete csupán ennek a három alapvető eseménynek a monoton ismétlődéséből adódik.” A szóban forgó alapvető események: a foton mozgása egyik helyről a másikra, az elektron mozgása egyik helyről a másikra és egy elektron és egy foton kölcsönhatása.⁴¹

Jóllehet a kísérletek tökéletesen igazolják az elméletet, van néhány bizarr vonása - még annál is bizarrabb, mint amit eddig bemutattam. Amikor például két elektron a kölcsönhatása során fotont cserél, akkor az elmélet nagyon pontosan leírja, mi történik. Hétköznapi szemléletünkkel arra gondolhatnánk, hogy az egyik elektron kibocsát egy fotont, majd valamivel később (vagy esetleg sokkal később) a másik elektron elnyeli. Ugyanilyen joggal azonban azt is kijelenthetjük, hogy a második elektron „valamikor a jövőben” kibocsátja a fotont, amely az időben visszafelé utazik, és a „múltban” elnyeli őt a másik elektron. Ez egyáltalán nem túl merész feltételezés, különösen azért nem, mert korábban már láttuk, hogy az időnek semmilyen jelentősége sincs a foton számára. Ám ugyanez igaz magára az elektronra is!

Ha egy fotonnak elegendő energiája van, akkor átalakulhat két elektronszerű részecskévé (a dolog fortélya, hogy a foton E energiájának nagyobbnak kell lennie, mint mc^2 értéke a két elektronra együttesen). A két részecske egyike közönséges elektron, a másik viszont ugyanolyan, mint az elektron, de töltése nem negatív, hanem pozitív, ezt a részecskét pozitronnak nevezzük. Mint mindig, a folyamatot leíró egyenletek ebben az esetben is szimmetrikusak. Ha egy elektron és egy pozitron találkozik, akkor ugyanez a folyamat visszafelé játszódik le, a két részecske annihilálódik, azaz átalakul egy nagy energiájú fotonná. A hagyományos kép szerint, amit a kísérletekben már számtalanszor megfigyeltek, az egyik helyről a másik felé mozgó, nagy energiájú foton ilyen módon átalakulhat elektron-pozitron párrá. A két részecske ellentétes irányba repül szét, majd a pozitron nagyon hamar összetalálkozik egy másik elektronnal, annihilálódnak, és egy másik, nagy energiájú fotont keltenek.

Feynman azonban rájött, hogy ez az egész kölcsönhatás egyetlen elektronnal is leírható. Ez az egyik helyről a másikra tartó elektron kölcsönhatásba lép egy nagy energiájú fotonnal. A kölcsönhatás eredményeképpen az elektron elindul visszafelé az időben, és mindaddig megy, amíg kölcsönhatásba nem kerül egy másik, nagy energiájú elektronnal, ennek hatására ismét „visszafordul”, és attól kezdve megint előre felé halad az időben. Úgy tűnik, mintha a két kölcsönhatás mindegyikében három objektum lenne jelen, egy pozitron, egy elektron és egy

foton. Ehhez hasonlóan, amikor egy fénysugár visszaverődik a tükör felületéről, látszólag akkor is három objektum van jelen - két fénysugár, amelyek a tükör egy pontjában éppen a megfelelő szögben találkoznak, és maga a tükör. Ám ugyanúgy, ahogy az utóbbi esetben csak egyetlen fénysugár van jelen, amelyik a tükör felületéről visszaverődve irányt változtat a térben, az első esetben egyetlen elektron van jelen, amelyik visszaverődik az időben. A foton az elektron számára „időtükörként” viselkedik.

Azalatt, amíg az elektron visszafelé halad az időben, számunkra, az időben előre felé haladó megfigyelők számára pozitronnak látszik ('a negatív elektromosság elvétele', vagyis időben visszafelé mozgása a negatív negatívjának klasszikus szabálya alapján ugyanaz, mintha a pozitív töltés az időben előre felé haladna). Ahogy az elektron mágneses momentumára vonatkozó számítások egyre bonyolultabbak lettek, egy idő után már az ehhez hasonló, az elektronokkal kapcsolatos „extra” fotonok hatását is figyelembe kellett venni.

Ez már majdnem minden, amit a kvantumelektrodinamikáról el kellett Önöknek mondanom, sőt Önök valószínűleg úgy érzik, hogy már több is, mint elég. Mindamellett szeretném hangsúlyozni, hogy ezek a bizarr következmények nem csupán öncélú ráadások, amelyeket az emberek riogatására találtak ki. Ezek a fizika legjobb elméletének alapvető jellegzetességei, amely elmélet kidolgozása 1965-ben három fizikusnak hozta meg a Nobel-díjat (Feynman, Schwinger és a japán Sinitiro Tomonaga). Ez az elmélet az ékkő a tudomány koronáján. Emiatt az olyan furcsaságoktól, mint az időben visszafelé haladó fotonok, sőt elektronok, csak úgy tudnánk megszabadulni, ha magától az egész kvantumelektrodinamikától megszabadulnánk.

Mindezek után még egyetlen vallomással tartozom. Van egy kis probléma a kvantumelektrodinamikával. Nem pontosan ez a tökéletes elmélet. A probléma lényegében azzal függ össze, ami magával az egyik helyről a másikra tartó elektronnal történik. Még egy magányos elektron is képes kisugározni, majd elnyelni fotonokat, és még ezek a csak átmenetileg létező fotonok is képesek elektron-pozitron párrá alakulni, amely részecskék azután egymással találkozáskor annihilálódnak, újabb fotont hoznak létre és az eredeti helyett ez nyelődik el. Ezek az átmenetileg létező elektronok és pozitronok további fotonokat sugározhatnak ki, feltéve, hogy azokat később el is nyelik, és így tovább, egyre tovább. A kvantumelektrodinamika szerint az ilyen bonyolult kölcsönhatások rétegei sorra egymásra rakódnak, mégpedig minden egyes elektron körül. A probléma az, hogy mindezen lehetséges önkölcsönhatások miatt a valószínűségek további végtelen sokaságát kell az összegzésnél figyelembe venni, ezért még az olyan egyszerű számítás is kifog rajtunk, mint az elektron töltésének vagy tömegének meghatározása. Válaszként ugyanis végtelent kapunk, ami nyilvánvalóan képtelenség.

Feynman, Schwinger és Tomonaga megtalálták a módját, miként lehet a végtelenektől megszabadulni. A módszert renormálásnak nevezik; lényegében egy egyenlet mindkét oldalát elosztjuk egy végtelen nagy számmal, hogy a kívánt eredményt kapjuk - tehát olyasvalamit cselekszünk, amiről már az iskolában is azt

tanították, hogy nem szabad. Ráadásul a trükk csak azért működik megfelelően, mert a kísérletekből tudjuk, mekkora értéket akarunk az elektron tömegére kapni. A fizikusok csak azért fogadják el a renormálást, mert nincs más választásuk - ha megteesszük, akkor legalább helyes választ kapunk, míg más elméletek ugyanerre akkor sem képesek, ha hasonló szabálytalanságokra vetemedünk. A három tudós tehát megkapta a Nobel-díjat, amiért mindenki számára megmutatta, hogyan kell megtenni azt, amit nem szabadna megtenni. Ám Feynman néhány évvel a halála előtt így nyilatkozott: „az, hogy ilyen hókuszpókuszhoz kellett folyamodnunk, megghiúsította annak bizonyítását, hogy a kvantumelektrodinamika önmagában konzisztens elmélet... (a renormálást) örületes folyamatnak tartom!”⁴²

Ezek szerint a kvantumelektrodinamika a jelenlegi formájában szinte egészen biztosan nem az utolsó szó a fizika történetében, és a fizikusok utánunk következő generációi sem maradnak munka nélkül. Mindamellett a kvantumelektrodinamika bármely tökéletesített változatának mindazt meg kell tudnia magyarázni, amire a kvantumelektrodinamika ma magyarázatot ad, de lehetőleg még ennél is pontosabban, hiszen különben nem beszélhetnénk az elmélet továbbfejlesztéséről. Ez azt is jelenti, hogy el kell tûrnünk a pályaintegrálokat, a térbeli mozgásuk közben a szomszédos pályákat „kiszagoló” részecskéket, és azokat a részecskéket, amelyek a fizika törvényeivel teljes összhangban, az időben visszafelé mozgókként írhatók le. Mindez elvezet Feynman egy másik, kevésbé reklámozott felfedezéséhez, amelyik a kulcsot jelentheti a kvantumvilág titkainak megfjtéséhez.

Fény a jövőből

Tulajdonképpen ez volt az első Feynman számos, meghökkentően eredeti felfedezése közül. Mindez még 1940-ben történt, amikor Feynman Princetonban végzős egyetemi hallgatóként John Wheeler szakmai irányításával dolgozott. A kvantumelmélet művelőinek életét megkeserítő végtelenek problémáját abban az időben már jól ismerték - bár a renormálás trükkjének felfedezésére még nyolc évet kellett várni. Feynman arra volt kíváncsi, hogy vajon meg lehet-e szabadulni ezektől a végtelenektől, ha megtiltjuk az elektronok kölcsönhatását önmagukkal. Sajnos ez a csel nem jött be.

Amikor az elektronokat gyorsítjuk - tehát meglökjük őket -, akkor ellenállást tanúsítanak. Jobban ellenállnak a gyorsításnak, mint egy töltés nélküli elemi részecske. A vezetékekben folyó elektromos áramot alkotó elektronok ugyanis energiát sugároznak (rádióhullámok forrásában), ha gyorsítjuk őket, de nem sugároznak annyi energiát, mint amennyi a vezetékekben történő továbbításukhoz szükséges. Ez az ellenállás egy újabb formája (amelyet sugárzási ellenállásnak nevezünk, mert a sugárzást létrehozó gyorsulással függ össze), amely hozzájárul a vezetéken folyó, egyenletes erősségű áram esetében a vezeték által kifejtett, közönséges elektromos ellenálláshoz. A sugárzási ellenállás csak azért lép fel, mert az elektron kölcsönhatásba lép valamivel. Mivel úgy tűnt, hogy az elektron nem képes az üres térrel kölcsönhatásra lépni, ezért az 1930-as években a

sugárzási ellenállást az elektron önmagával való kölcsönhatásával magyarázták, többé-kevésbé oly módon, ahogyan azt az imént vázoltam.

Feynmannak azonban ragyogó ötlete támadt. Soha senki nem látott még valóban elszigetelt elektront, mivel a Világegyetemet óriási számban töltik ki a legkülönbözőbb fajta részecskék (valójában, ha ott van valaki, aki „látja” az elektront, akkor az már nem tekinthető elszigeteltnek). Feynman egy tökéletesen üres Világegyetemet képzelt el, amelyben semmi más nincs, csupán egyetlen elektron, és arra volt kíváncsi, képes-e egyáltalán ez az elektron elektromágneses energia kisugárzására. Megemlítette Wheelernek, hogy talán minimálisan két elektronnal lenne szükség ahhoz, hogy maga a sugárzás létezzék, az egyik elektron kibocsátja, a másik pedig elnyeli a sugárzást. A mindössze két elektront tartalmazó Világegyetemben az egyik elektron ide-oda rezegve fotonokat sugározhat ki, amelyeket a második elektron elnyel. Ennek hatására az is rezgésbe jön, és újabb fotonokat bocsát ki, ezek elérik az első elektront és nekiütköznek, ezáltal ellenállást fejtenek ki annak eredeti rezgésével szemben.

Ebben az egyszerû formájában azonban az ötlet nem működik. Az alapvető problémát az időkézés fellépése jelentené - a fotonoknak el kell jutniuk az első elektrontól a másodikig, majd vissza, mielőtt az első elektron „észrevehetné” a saját rezgésével szembeni ellenállást. Arn amint láttuk, fotonok cseréje esetén az idő nem számít. Ha előreugrunk a történet mai szemléletéig, akkor azt kell mondanunk, hogy a kvantumelektrodinamika (amelyet 1940-ben még nem fedeztek fel) nem tesz különbséget az idő előre vagy visszafelé múlása között, legalábbis fotonok esetében. Ez logikus, mivel a kvantumelektrodinamika relativisztikus elmélet, amely teljes mértékben a speciális relativitáselmélet alapján nyugszik, márpedig a relativitáselmélet szerint a foton számára nem létezik az idő. Ha a foton számára a kicserélődés nulla ideig tart, akkor nem különösebben érdekes, hogy a foton saját órája +0 vagy -0 értéket mutat. Mindkét elmélet sikere arra utal, hogy maga a Természet nem tesz különbséget a (mi nézőpontunkból) az időben előre vagy hátrafelé mozgó elektronok között. A Természet semmi másról nem vesz tudomást, csak a foton kicserélődésének tényéről.

Bár a kvantumelektrodinamikát csak 1940-ben fedezték fel, Wheeler és Feynman tudta, hogy Maxwell egyenletei az időben tökéletesen szimmetrikusak. Ha megoldjuk az egyenleteket a sugárzás terjedésére, akkor mindig két megoldást kapunk, az egyik megoldásnak megfelelő hullám az időben előre, a másik az időben visszafelé terjed. Mai ismereteink birtokában persze tudjuk, hogy ennek akkor van értelme, ha maga a fény nulla idő alatt terjed. Amikor azonban Feynman előállt az új ötletével az elektronok sugárzásáról, akkor még a Maxwell-egyenleteknek ezt a második megoldását mindenki figyelmen kívül hagyta, mert „nyilvánvalónak” tartották, hogy nem létezhetnek az időben visszafelé haladó hullámok.

Feynmannak és Wheelernek azonban éppen erre volt szüksége, hogy Feynman ötletét megmentse. Fejezetünk hátralévő részében ragaszkodjunk a fény hullámokként való leírásához. Az elektronból vagy akár egy antennából kilépő

hullámokat „retardált” (azaz késleltetett) hullámoknak nevezzük, mert csak kibocsátásuk után érkezhettek meg valahova. Az időben visszafelé haladó hullámokat ezzel szemben „avanzsált” hullámoknak nevezzük, mert ezek előbb érnek célhoz, mint ahogy valahol kibocsátották őket. A retardált hullámokat a rádióantennából induló, minden irányban egyenletesen terjedő fodorzódásoknak tekinthetjük, mint ahogy a vízbe dobott kő nyomán a tó felszínén egy pontból kiinduló körhullámok terjednek szét. A mi emberi nézőpontunkból viszont az avanzsált hullámok olyanok, mintha minden irányból egyenletesen az antenna felé haladnának, vagyis mintha a vízhullámok a pocsolya szélén keletkeznének, majd a közepén egyetlen pontba futnának össze. Az analógia persze sántít, mert az avanzsált vízhullámok esetében a hullámok által a tó közepére szállított energiával nem tud mi történni. Ugyanakkor viszont az elektron esetében éppen a Világegyetem egészéből az elektronunkhoz érkező avanzsált hullámokra van szükségünk a sugárzási ellenállás magyarázatához. A bejövő hullámok energiája elnyelődik, és akadályozza az elektron mozgását. De vajon honnan tudják az avanzsált hullámok, hol van az elektron? Nos onnan, hogy maga az elektron árulta el nekik, hol kell keresniük.

A „Wheeler-Feynman-féle elnyelési elméletként” ismert elmélet legújabb változatában (a témavezetők mindig megtalálják a módját annak, hogy az ő nevük kerüljön előre, ha az irányításukkal dolgozó egyetemi hallgatóval közösen felfedeznek valamit) a rezgő elektron retardált és avanzsált hullámokat egyaránt kibocsát (a jövő, illetve a múlt irányába). Ha ezek a hullámok bárhol (térben és időben egyaránt érve) a Világegyetemben összetalálkoznak egy elektronnal (pontosabban szólva, bármilyen elektromos töltésű részecskével), akkor a másik elektront rezgésre késztesik. Ez a rezgés azt jelenti, hogy a másik elektron is sugárzást bocsát ki, természetesen mind a jövő, mind pedig a múlt irányába. Ennek eredményeképpen az elektromágneses hullámok egymást átszövő tengere jön létre, amely hullámok - az egyetlen elektron rezgésének eredményeképpen - az egész Világegyetemet kitöltik. A hullámok nagyrészt kioltják egymást, hasonlóan ahhoz, ahogyan a fényvisszaverődésének kvantummechanikai leírásánál láttuk. Egynémely hullámok azonban, a jövőből és a múltból egyaránt, visszatérnek az eredeti elektronhoz, és kifejtik azt az ellenállást, amire az elektronok gyorsítással szemben mutatott viselkedésének magyarázatához szükségünk van.

Wheeler már 1941-ben azt javasolta Feynmannak, hogy tartson egy előadást Princetonban, az elméleti fizika tanszéken. Ez lett volna a fiatal kutató első formális bemutatkozása egy ilyen illusztris hallgatóság előtt. Noha az előadás csak a „házon belülieknek” szólt, Princeton azért mégiscsak Princeton volt, és mivel 1941-et írtunk, a hallgatóság soraiban ott ült Albert Einstein és Wolfgang Pauli (a kvantummechanika egyik úttörője, akinek képességeire jellemző, hogy 1919-ben, 19 éves korában a tiszta és világos magyarázat iskolapéldájának tartott monográfiát írt mindkét relativitáselméletről, tehát a speciális és az általános elméletről együttesen). Rajtuk kívül sokan mások is jelen voltak, akik azonban eltörpültek a két zseniális tudós mellett. Az előadás után Pauli szelíden ellenkezve megjegyezte, hogy a leírás valójában matematikai tautológia volt, és megkérdezte Einsteint, egyetért-e ezzel a véleményével. „Nem”, felelte Einstein,

„az elmélet lehetségesnek látszik...”⁴³

Túlzás lenne azt állítani, hogy Feynman soha nem nézett vissza a múltba, de talán nincs még egy olyan végzős egyetemista a fizika történetében, aki ilyen lenyűgöző jóváhagyással indulhatott volna neki kutatói pályájának. De vajon mi tetszett ennyire Einsteinnek?

Azok után, amit a pályaintegrálokról megtudtunk, talán nem is túl meglepő a felismerés, miszerint a számítások során az egymással kölcsönható hullámok szövevényes hálózatából jórészt eltűnik a bonyolultság, és csak az eredeti elektron meglehetősen egyértelmű „reakciója” marad vissza. Az avanszált hullámok egyike sem marad fenn a szóban forgó reakción kívül bármilyen más módon észlelhető formában, így csupán a jól ismert retardált hullámokat „láthatjuk”.

Az egész elmélet szépségét azonban mindenekelőtt az jelenti, hogy az eredeti elektron számára mindez pillanatszerűen játszódik le. A hatás egy része az elektronból a jövő irányába induló hullámokból ered, amelyek viszont a múlt felé haladó hullámokat keltenek. Ez utóbbiak éppen a megfelelő pillanatban érkeznek vissza a jelenbe. A hatás másik része a múlt felé induló hullámokból származik, amelyek valahol a jövő felé haladó hullámokat generálnak. Ám mindkét esetben az elektron mellett (vagy bárhol másutt) elhelyezett óra szerint a hullámok pontosan ugyanannyi ideig mentek előrefelé az időben, mint visszafelé, függetlenül attól, hogy eközben mekkora távolságot tettek meg. A reakció abban a pillanatban bekövetkezik, amikor az elektront gyorsítjuk - A Wheeler-Feynman-elmélet képes magyarázatot adni a sugárzási ellenállásra, arra azonban nem képes, amiért Feynman eredetileg hozzáfogott ehhez a munkához, nevezetesen, nem tudja eltüntetni a végteleneket a kvantumelméletből. Ez gyakran előfordul a tudományban, valamely probléma ösztönzést adhat egy bizonyos kutatáshoz, ám a kutatás eredménye végül egy egészen más probléma megoldását adja a kezünkbe (vagy korábban nem is sejtett, újabb kérdéseket vet fel).

Van azonban még egy csavar a történetben, ami fél évszázaddal ezelőtt még az elmélet fatális hibájának tűnt. Az egész úgy csak akkor működik, ha az elektron által kisugárzott energia az utolsó szemig időben „visszaverődik”. Ha a sugárzás egy része kiszökik az üres térbe, és soha többé nem találkozik töltött részecskével, akkor az egyenletek nem fognak egyensúlyba kerülni. Régebben azt gondolták, hogy a Világegyetem térbeli kiterjedését tekintve végtelen, és „nyílt” szerkezetű. Ha minden sugárzást vissza akarunk terelni az eredetéhez, az éppoly reménytelen, mintha egy fedél nélküli dobozban akarnánk benntartani a sugárzást. A Wheeler-Feynman-elmélet csak akkor ad helyes választ, ha a Világegyetem zárt dobozra hasonlít (vagyis olyan, mint egy fekete lyuk belseje), amelyből egyáltalán nem tud az energia kiszökni. Nos, akár hiszik, akár nem, az 1980-as és 1990-es években a csillagászok - olyan meggondolásból, aminek az égvilágon semmi köze a Wheeler-Feynman-elmülethez, meggyőző bizonyítékot

43 Idézi Gleick: Genius, 115. oldal.

szolgáltattak amellett, hogy a Világegyetem valóban „zárt” szerkezetű.⁴⁴

Ma már nincs ellentmondás az elnyelési elmélet és a kozmológia között. Sőt egyes elméleti fizikusok véleménye szerint mélyreható kapcsolat áll fenn a Világegyetem jelenlegi tágulásának ténye, és azon tény között, hogy csak a jövő felé tartó retardált hullámokat érzékeljük, ezzel szemben nem szerzünk tudomást a minden töltött részecske felé tartó retardált hullámokról. A Wheeler-Feynman-elmélet továbbra is a legjobb magyarázat arra, miért lép fel a sugárzási ellenállás, és hogyan cserélnek fotont a töltött részecskék, bár erre soha nem jönnénk rá abból, ahogyan a legtöbb középiskolában és egyetemen a fizikát tanítják. Furcsa módon ez azt jelenti, hogy bizonyos értelemben őseinknek igaza volt - szemünk valóban kibocsát fotonokat, cserébe azokért a fotonokért, amelyeket a fényforrások kisugároznak. Ám a tükörről örületes szögekben visszaverődő fotonokhoz hasonlóan, a hétköznapi világunkban ezeket sem láthatjuk, mert a valószínűségek kiejtik egymást. A lényeg az, amire még egyszer rámutatunk, hogy a hagyományos kép, amely szerint a fotonok a fényforrástól a szemünkig (vagy bármilyen más tárgyig) mozognak, nem teljes. Az időnek nincs értelme a foton számára, ezért mindössze annyit jelenthetünk ki, hogy a fényforrás és a szemünk (vagy bármilyen egyéb tárgy) között folyamatosan fotonok cseréje zajlik.

Különösnek gondolják mindezt? Nos, amit ebben a fejezetben leírtam, nem csupán igaz, hanem a fizika szilárd, jól megalapozott pillére. A speciális relativitáselmélet néhány éven belül százéves lesz, de lassan a kvantumelektrodinamika is az ötvenedik születésnapja felé közeledik. Ezek az elméletek ma már a természettudomány szilárd alapját képezik, amelyeket alaposan megértettünk (legalábbis azt, hogyan kell a különféle számításokat elvégezni), és amelyek igazságát újra és újra kísérletekkel támasztjuk alá. Ha azonban valóban meg akarjuk találni a kvantummechanika olyan értelmezését, amelyik legalább a világ működésének érzését kelti - valójában milyen is a valóság -, akkor még számos különös jelenséget meg kell tudnunk magyarázni. Akad ezek között néhány régi gondolat, amelyeket csak legújabbán sikerült kísérleti ellenőrzésnek alávetni; míg mások újabb elgondolások, amelyek kísérleti ellenőrzése a jövő feladata. Mind nagyon különös, de mind igaz.

3. Különös, de igaz

A kvantumvilágnak általában, és azon belül különösen a fény viselkedésének egyik legfurcsább tulajdonsága a polarizációnak nevezett jelenség során mutatkozik meg. Első pillanatban a polarizáció a mozgó hullámok egyszerű tulajdonságának tűnik, amelynek magyarázata az akkori fizika fogalmai segítségével a Maxwell-elmélet egyik első, nagy sikerének számított. Képzeljük el ismét, hogy egy rugalmas kötel végét tartjuk a kezünkben, és a kötel másik végét egy fához kötöttük. Amint korábbi példánkban is tettük, kezünket föl-le rázva hullámokat indíthatunk el a kötel mentén, aminek hatására a kötel egyes pontjai ugyancsak föl-le mozognak. A létrejövő jelenséget „függőlegesen polarizált”

44 Lásd Gribbin: In the Beginning.

hullámnak nevezhetjük. Ha a kezünket oldalirányban mozgatjuk, akkor hasonló hullámok alakulnak ki a kötélen, ám annak pontjai most jobbra-balra fognak kitérni - tehát „vízszintesen polarizált” hullám alakult ki.

Sokkal nehezebb elképzelni a két, egymásra merőleges összetevőből (a hullám elektromos és mágneses részéből) álló rendszer esetében a polarizációt, míg a fotonok esetében a köté analógiája végképp csődöt mond. A lényeg azonban az, hogy még a magányos fotonok is magukkal visznek valamilyen kitüntetett orientációt. Jobb híján arra gondolhatunk, mintha minden foton magával vinne egy kis nyilacskát. Ez a jelzés akár függőlegesen (vertikálisan polarizált fény esetében), akár vízszintesen (horizontális polarizáció esetén), akár a kettő közötti tetszőleges irányba (köztes irányú polarizáció esetén) mutathat.

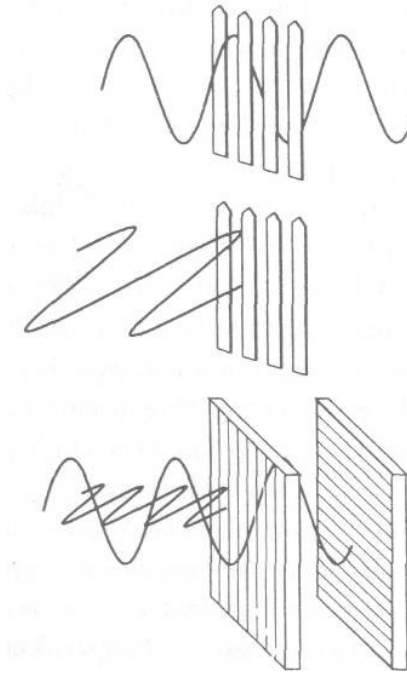
A közönséges fény, például a Nap sugárzása vagy amit egy hagyományos villanykörte kibocsát, polarizálatlan. Ezt úgy képzelhetjük el, hogy a fényforrásból kiáramló fotonok özönében minden részecske nyila más-más irányba mutat, egyeseké erre, másoké arra, lényeg az, hogy nincs kitüntetett irány. Könnyű azonban polarizált fényt előállítani; ehhez a polarizálatlan fényt elég átengedni egy olyan közegen, amelyik csak egy meghatározott irányba mutató fotonokat enged át. Kicsit megkeverve az eredeti hasonlatunkat (miért ne tehetnénk meg, hiszen maga a Természet is összekeverni látszik a dolgokat?) arra gondolhatunk, hogy ha a kezünk és a fa között kifeszített kötelet átbújtatjuk egy magas léckerítés résén, akkor függőlegesen polarizált hullámokat továbbra is akadálytalanul küldhetünk a kezünktől a fáig. Ám ha vízszintesen polarizált hullámokat indítunk útnak, azok a kerítésnél elakadnak, hiszen a kerítés lécei megakadályozzák a kötélpontjainak oldalirányú elmozdulását.

Léteznek természetes polarizáló anyagok, figyelemreméltó például a kalcit nevű kristály. Amikor a fénysugár szembetalálja magát a kristály rendezett belső szerkezetével, valami hasonló történik, mint a kerítés és a kötélpontjában. A mesterséges polarizátorok, például a polaroid napszemüvegek ma már széles körben elterjedtek. Az ilyen típusú napszemüvegek két szempontból is előnyösek. Egyrészt csak egy bizonyos orientációjú fotonokat engednek át, miáltal jelentősen csökkentik a szemünkbe jutó fény mennyiségét. Másrészt, mivel a vízszintes felületekről visszaverődő fény általában vízszintesen polarizált, ha a napszemüveg csak a függőlegesen polarizált fényt engedi át (a valóságban a napszemüvegek mindig ilyenek), akkor hatékonyan csökkenti a fény visszaverődéséből adódó, zavaró csillogást. Ezért olyan hasznosak a polaroid szemüvegek éjszakai autóvezetésnél (mert nem engedik át a szembejövő járművek fényéből az útfelületről visszaverődő részt), és amikor a Nap nagyon magasan jár az égen.

A lehetetlen fény

Ha polaroid napszemüvegünk lencséje közönséges körülmények közt csak a függőlegesen polarizált fényt engedi át, akkor - ha levesszük a szemüveget és keresztbe fordítjuk úgy, hogy a szemüveg szárai ne kétoldalt, hanem alul-fölül helyezkedjenek el - a lencsék csak a vízszintesen polarizált fényt fogják

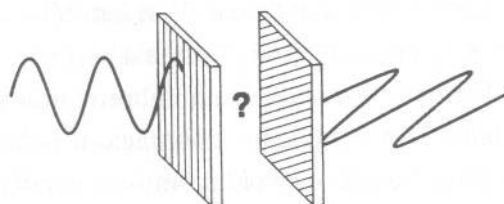
átengedni, mintha a kerítéses példánkban a kerítés léceit az oldalukra fektettük volna. A horizontális polarizációjú fény nem tud áthaladni a függőleges orientációjú polárszűrőn, ezért elég nyilvánvaló, hogy ha két polaroid szemüveg közül az egyiket felvesszük, a másikat pedig keresztbe fordítva eléje tartjuk, akkor a két, egymás elé helyezett lencsén keresztül semmit sem fogunk látni. Most az egyszer a fotonok úgy viselkednek, ahogyan azt a hétköznapi logikánk alapján is várjuk; próbálja ki Ön is, és látni fogja, hogy nem lát semmit. A két polárszűrővel tulajdonképpen egy „keresztpolarizátort” állítottunk elő.



14. ábra Ha a fény hullám, akkor könnyű megérteni, miért tud átcsusszanni a „függőlegesen polarizált” tenysugár a polarizáló tulajdonságú anyag egy darabkáján, amelyet a felső rajzon léckerítés szemléltet.

A vízszintes polarizációja hullámok nyilvánvalóan nem tudnak átjutni a lécek között (középen).

Ha két polarizáló tulajdonságú anyagot merőlegesen keresztbe fordítunk, akkor sem a függőlegesen, sem pedig a vízszintesen polarizált hullámok nem képesek átjutni a kettős szűrőn (lent).

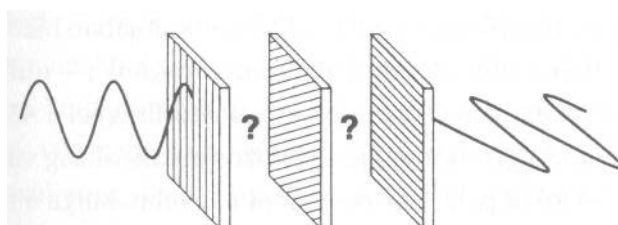


15. ábra Különös, de ha a második polarizátor 45 fokos szögben áll az elsőhöz képest, akkor nem akadályozza meg a függőlegesen polarizált fény átjutását. A fénynek pontosan a fele átjut, ám ettől kezdve 45 fokos polarizációjú fényként halad tovább.

A józan ész diadala azonban nem hosszú életű. A hétköznapi világban teljesen nyilvánvaló, hogy ha két lencsét az említett módon egymás mögé helyezünk, akkor fény egyáltalán nem juthat keresztül a rendszeren, és természetesen akkor sem változik a helyzet, ha az eredeti kettő közé egy harmadik lencsét is beteszünk. Ebben az esetben azonban a józan ész ismét csődöt mond. Vegyünk egy harmadik napszemüveget is, és tartsuk 45 fokos szöget bezáró helyzetben az első kettő között úgy, hogy egyik lencséje éppen az egymásra merőlegesen álló lencsék között helyezkedjék el. Ha nem tesszük oda a harmadik lencsét, akkor semmi fény sem jut át, a látómezőt sötétnek látjuk. Amikor azonban a harmadik lencsét odatesszük az első kettő közé, akkor valamennyi fény mégiscsak átjut a három lencsén. Nem annyi, mintha csak egy lencse állna a fény útjában (annak körülbelül a negyede), de azt határozottan érzékeljük, hogy valamennyi fény mégiscsak átjut ott, ahol ennek nem szabadna megtörténnie. Miért?

Első lépésként vegyük szemügyre azt a helyzetet, amikor csak két polarizátort használunk, de azokat nem egymásra merőlegesen, hanem 45 fokos szögben helyezzük el. Most már ne foglalkozzunk a napszemüvegekkel, hanem gondosan kivitelezett laboratóriumi kísérletekre gondoljunk, ahol pontosan mérhető a polarizátorok állása, valamint a kísérletben szereplő polarizált fénynyalábok polarizációja és erőssége. Mondjuk, hogy az első polarizátoron áthaladó fény vertikálisan polarizált. Mi történik, amikor ez a fénysugár eléri a második polarizátort, amelynek a „rései” 45 fokos szöget zárnak be a függőlegessel?

A léckerítés analógiája alapján arra számíthatnánk, hogy semennyi fény nem jut át. Valójában azonban a függőlegesen polarizált fénysugárnak pontosan a fele keresztüljut a második polarizációs szűrőn - és a második polarizátor túloldalán kilépő fénysugár 45 fokos, vagyis pontosan a második polarizátor állásának megfelelő polarizációt mutat. Amikor tehát ez a csökkentett erősségű fény megérkezik a harmadik polarizációs szűrőhöz, amelyik az elsőre merőlegesen, tehát vízszintesen áll, akkor a belépő fény polarizációs síkja a harmadik polarizátorával 45 fokos szövet zár be. A fénynek ismét átjut a fele - és ebben az esetben a kilépő nyaláb vízszintes polarizációjú lesz. A két, megfelelő irányba állított polarizátoron áthaladó, eredetileg függőleges polarizációjú fény erőssége a negyedére (a felének a felére) gyengül, miközben polarizációja vízszintessé válik.



16. ábra Még az előzőnél is furcsább, de az előzőhöz képest rendre 45 fokkal elfordított három polarizátor a ráeső, függőlegesen polarizált fény negyedét átengedi, polarizációját pedig vízszintesre változtatja. Ha viszont a középső polarizátort kivesszük, akkor semennyi fény nem jut át a rendszeren.

A kísérletet olyan gyenge fénnel is elvégezhetjük, hogy a fotonok csak egyenként haladnak át a keresztbe fordított polarizátorokon. Akárcsak a kétréses kísérlet esetében, itt is megoldható, hogy egyszerre csak egyetlen foton tartózkodjék a kísérleti berendezésben. Ha így hajtjuk végre a kísérletet, akkor azt tapasztaljuk, hogy várakozásunknak megfelelően egy függőleges polarizációjú foton (vagyis egy olyan, amelyik akadálytalanul átjutott az első, függőlegesen álló polarizátoron) érkezik a második, 45 fokos szögben álló polarizátorra. Itt 50:50 százalék annak az esélye, hogy átjut, illetve elakad. Ha a kísérleti berendezésnek ebbe a részébe 100 darab, függőlegesen polarizált fotont engedünk be, akkor 50 elakad a második polárszűrőnél, 50 viszont keresztüljut, de attól kezdve ezeknek már 45 fokos lesz a polarizációja. A következő polarizátornál, amelyik az elsőre merőlegesen, vagyis vízszintesen áll, az 50 túlélő foton közül 25 elakad, 25 viszont ezen is átjut, ám ezeknek vízszintessé válik a polarizációja.

Természetesen a kísérletet a két polarizátor egymáshoz képest különféle állásai mellett is elvégezhetjük. Ha mindkét polarizátor függőlegesen áll, akkor minden függőleges polarizációjú foton átjut. Ha viszont a két polarizátor egymásra merőleges, akkor egyetlen foton sem jut át. A két polarizátor egymáshoz viszonyított állását e két szélső helyzet között folyamatosan változtatva a rendszeren átjutó fotonok aránya is folytonosan változik a 100 százaléktól a nulláig. Úgy tűnik, mintha minden függőlegesen polarizált foton valójában bizonyos valószínűséggel eltérő polarizációt is hordozna magában - nulla valószínűséggel vízszintest, ám 50 százalékos valószínűséggel a 45 fokos polarizáltság lehetőségét. A mondjuk 30 fokos polarizáltság valószínűsége kisebb, a 60 fokos polarizációé viszont nagyobb. Maga a foton valójában határozatlan állapotban van, az állapotok valamiféle szuperpozíciójában, mindaddig, amíg a polarizációját meg nem mérjük. Akkor dönti csak el, hogy megfelelő-e a polarizáltsága, vagyis szigorú valószínűségi szabályok határozzák meg, hogy átjut-e a szűrőn vagy nem. Paul Davies ezt a következőképpen fogalmazta meg:

Hangsúlyoznunk kell, hogy a kvantummechanikai meghatározatlanság nem egyszerűen azt jelenti, hogy nem tudjuk, milyen polarizációjú valójában a foton. Sokkal inkább azt jelenti, hogy nem létezik meghatározott polarizációjú foton. Magának a fotonnak az önazonossága eredendően magában hordoz valamiféle belső bizonytalanságot, ami nem a róla szerzett ismereteink bizonytalansága.⁴⁵

De ez még mind semmi - a java csak ezután következik.

A kalcitkristály egy fontos tulajdonságát tekintve különbözik a polaroid napszemüvegtől. Amikor egy fénysugár kölcsönhatásba lép a kristállyal, akkor

nem egyetlen polarizált nyaláb lép ki a kristályból. A kristály két nyalábra bontja a fényt, amelyek polarizációja egymásra merőleges lesz, a két sugár a kristály túlsó oldalának kissé különböző helyein lép ki. A függőlegesen, illetve vízszintesen polarizált sugarak kissé eltérő útvonalon haladnak a kristály belsejében. Ha a beeső sugár pontosan a két szélső helyzet közötti polarizációjú (vagyis ha a kristályra eső fényt előbb átengedjük egy 45 fokos szögben álló polarizátoron), akkor a kristályból két, egyforma erősségű fénynyaláb lép ki, amelyek mindegyikének az intenzitása pontosan a fele az eredeti sugárénak. A két, egymással párhuzamosan haladó sugár közül az egyik függőleges, a másik vízszintes polarizációt mutat.

Ha egyetlen foton megy át a kristályon, akkor természetesen „el kell döntenie”, melyik útvonalat akarja követni. A kísérletek igazolják, hogy a foton vagy az egyik, vagy a másik pontban lép ki a kristályból, mindig az adott pontnak megfelelő polarizációval.

Ha fénynyalábbal végezzük el a kísérletet, akkor a két nyaláb útjába oly módon helyezhetünk el egy másik kristályt, hogy az első kristályból kilépő, vízszintes és a függőleges polarizációjú nyalábok abban ismét egyesüljenek, és a második kristályból csak egyetlen, 45 fokos polarizációjú nyaláb lépjen ki. A két kristály ilyenkor belső szerkezetüket és a kristályszerkezetnek a fénysugarakra gyakorolt hatását tekintve „egymással ellentétesen működik”.

De vajon mi történik, ha egyetlen foton megy végig a két kristályból álló rendszeren? „Nyilvánvalóan”, amikor az első kristályhoz érkezik, el kell döntenie, hogy vízszintes vagy függőleges polarizációjú akar-e lenni, és ennek megfelelően melyik útvonalon fog végigmenni.

Ezt az állítást a kísérlet legújabb, tökéletesített változata megerősíti. Képzeli el, hogy a két lehetséges útvonal egyikét lezárjuk, mondjuk úgy, hogy a két kristály közé átlátszatlan lapot tolunk be az egyik nyaláb kilépési helyéig, így a fény csak a másik útvonalon tudja végigjárni a teljes rendszert. Tételezzük fel, hogy ezzel a módszerrel az első kristályból kilépő összes horizontális polarizációjú foton továbbhaladását megakadályozzuk. Nos, a ténylegesen végrehajtott kísérletekben is ezt tették. Ebben az esetben az első kristályra érkező fotonok fele jut át a kísérleti berendezésen, és lép ki a második kristály túlsó oldalán - ám a fotonok mind függőlegesen polarizáltak. Pontosan ugyanilyen eredményt kapunk akkor is, ha a vertikális polarizációnak megfelelő csatornát takarjuk el és csak a horizontális polarizációjú fotonokat engedjük át a rendszeren - ami a józan ész újabb diadala.

De vajon mi történik akkor, ha a horizontális útvonalról elvesszük az akadályt, de egyszerre csak egy foton engedünk be a rendszerbe? A józan ész azt diktálná, hogy minden foton átjut a rendszeren, és a kilépéskor a polarizációja azonos valószínűséggel lesz horizontális vagy vertikális. Ha egyszer eldöntötte, milyen állapotban van, akkor aligha képzelhető el, hogy a második kalcitkristályba belépő foton ott átalakulna 45 fokos polarizációjúvá, vagy talán mégis előfordulhat? Nos, igen, éppen ez történik! Amikor a fénynyaláb olyan gyenge, hogy a kísérleti

elrendezésben egyszerre csak egy foton tartózkodik, a fény úgy viselkedik, mintha minden egyes foton kettévált volna, végigjárta volna mind a két lehetséges utat, majd önmagával egyesülve helyreállította az eredeti polarizációs állapotot. Minden egyes, az első kristályhoz érkező foton végigjárja a kísérleti berendezést, majd kilép a második kristály túloldalán, ahol a polarizációs állapota pontosan olyan lesz, mint amikor az első kristályba belépett. A valószínűségi hullámok a kísérleti eszköz elejétől a végéig minden lehetséges útvonalat felderítenek, és a teljes kísérleti elrendezés figyelembevételével „döntik el”, hogyan viselkedjenek, pontosan ugyanúgy, ahogyan a visszaverődés esetében is a tükör minden részét számításba véve „döntötték el”, milyen legyen a visszaverődés. Úgy tűnik, mintha minden egyes, a kísérleti berendezésen végigmenő foton, akármelyik úton is jár, tisztában lenne azzal, hogy a másik útvonal járható vagy el van zárva, és ennek megfelelően határozza meg saját viselkedését. Mindez azonban már régi nóta, legalábbis a kvantumelmélet viszonylatában, hiszen már évtizedek óta ismert jelenségről van szó. Ám az 1990-es években a kísérletezők még érzékenyebb kísérlet ötletével álltak elő, amelyben az egyes fotonok egyidejűleg hullámként és részecskeként viselkednek.

Fény derül a fényre

A kvantummechanika klasszikus értelmezésének - a koppenhágai értelmezésnek - kulcsfontosságú eleme a komplementaritás Niels Bohrtól származó ötlete. Ennek értelmében, ha egy kvantummechanikai objektumnak, például egy fotonnak kettős természete van, például részecske-hullám kettősséget mutat, akkor nem létezhet olyan kísérlet, amelyben mindkét jellegzetessége egyszerre megmutatkozna. Bohr úgy gondolta, hogy ha a kísérletet a fény hullámjellemzőinek mérésére tervezzük meg, akkor egészen bizonyosan a hullámtulajdonságokat fogjuk megmérni. Ha viszont a fotonokat mint részecskéket akarjuk kimutatni a kísérletben, akkor egészen biztosak lehetünk abban, hogy részecskéket fogunk észlelni. Soha nem észlelhetjük azonban egyidejűleg a hullám és a részecske tulajdonságait.

Ebben azonban tévedett. Japán kutatók 1992-ben végrehajtottak egy indiai kollégáik által kigondolt kísérletet, és pontosan az sikerült nekik, amit Bohr lehetetlennak tartott. Fotonokat figyeltek meg, amelyek egyszerre mutatták hullámszerű és részecskeszerű tulajdonságaikat.

Távolról sem világos egyelőre, mi ennek a kísérletnek a jelentősége a kvantumvilág megértése szempontjából. Egyetlen dolog azonban egészen biztos, ez az eredmény igen rossz hír a koppenhágai értelmezés standard formája számára. A magam részéről azonban ezt nem találom különösebben riasztónak, mert számomra világos, hogy a koppenhágai értelmezés a legtöbb esetben távolról sem a legjobb magyarázat a kvantumvilág működésének lényegére. Magát a kísérletet azonban érdekesebb részletesen is szemügyre venni, egyszerűen azért, mert szép példa a kvantumvilág hajmeresztő mivoltára.

A történet egyik legérdekesebb szála, hogy mielőtt a fizikusok be tudták volna

bizonyítani, hogy a fotonok hullámként viselkednek, először - az 1980-as évek közepén - be kellett bizonyítaniuk, hogy a fotonok valóban léteznek. Amint már említettem, a fotonok fogalmát Albert Einstein vezette be a fényelektromos jelenségre 1905-ben adott magyarázatában. Erőfeszítése miatt megérdemelten kapta meg később a Nobel-díjat. Az 1950-es évektől kezdődően számos kutató, legelőször David Bohm (akiről később még lesz szó) jött rá arra, hogy a fényelektromos hatás a fotonok fogalmának bevezetése nélkül is megmagyarázható! A fotoelektromos jelenség magyarázatához elég, ha a fényt a fémfelülettel kölcsönható, változó elektromágneses térnek tekintjük, és feltételezzük, hogy a fémfelület csak meghatározott nagyságú adagokban képes átvenni az energiát. Maga Planck felettébb boldog lett volna a hír hallatán, ám ez az eredmény egyúttal azt is jelenti, hogy Einstein nem érdemelte meg a Nobel-díját (legalábbis nem azért a munkájáért, amire ténylegesen odaítélték neki). Mindez azonban ma már pusztán tudománytörténeti kuriózum, hiszen a kísérleti fizikusok részben ezen ötletekből kiindulva mégiscsak bebizonyították, hogy valóban léteznek fotonok.

Az egyes fotonokat nem olyan könnyű tanulmányozni, mint amikor egyszerűen a fény erősségét egy szabályozható ellenállással addig csökkentjük, míg végül a fényforrás egyszerre csak egyetlen fotont bocsát ki. A probléma egy részét az okozza, hogy a fényt sok különböző atom együttesen bocsátja ki. Másrészt, az egyes atomok bizonyos mértékig szabadon „megválaszthatják”, pontosan milyen energiaátmeneteik vegyenek részt a kisugárzott fény létrehozásában. A fény energiájának valahonnan erednie kell - az energia forrása az a folyamat, amelynek során az elektronok az atomban az egyik energiaszintről átugranak egy másikra, miközben energiát veszítenek. A legtöbb esetben nagyon sok ilyen átmenet következik be; az energiaátmenetek széles tartományában együttesen hozzák létre a kibocsátott fényt. Ez a valószínűségek valamiféle átlagolását hozza be a folyamatokba, hasonló ahhoz, amilyent Feynman pályaintegráljai esetében láttunk; ez azt jelenti, hogy egy nagyon halvány fénysugár ténylegesen kevesebb energiát is képes szállítani, mint egyetlen foton, hiszen a fénysugár a sok különféle kvantumállapotra vett átlagértéket jeleníti meg (a döglött és az élő macska szuperpozícióját), amely állapotok legtöbbször üres, vagyis nulla fotont tartalmaz. Ezek a bizarr, alacsony energiájú fényimpulzusok hullámként viselkednek, és megfelelően érzékeny kísérletekben egymással interferenciára kényszeríthetők.

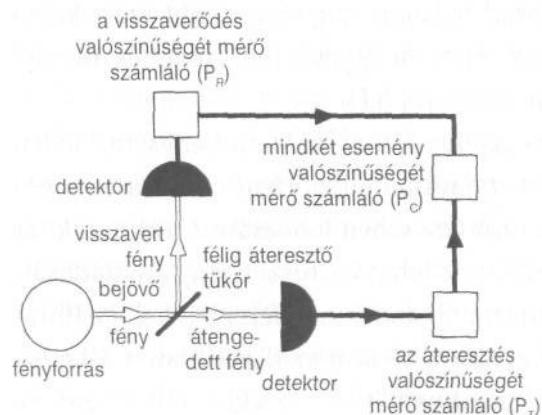
Ha igazán egyetlen fotont akarunk látni, akkor egyetlen atomot kell arra kényszeríteni, hogy két, jól meghatározott értékű energiaszintje között létrejövő, egyetlen energiaátmenettel egyetlen energiaimpulzust bocsásson ki. Ebben az esetben már nincs szó semmiféle szuperpozícióról, és a foton egyetlen, tiszta kvantumállapotban jelenik meg. A kísérletezők ezt úgy érték el, hogy kalciumatomokat lézerrésszel gerjesztettek (vagyis a lézersugárral adtak át nekik energiát). Gondoljunk arra, hogyan helyezkednek el az elektronok az atomban a lépcsőzetesen emelkedő energiájú szinteken. Így megértjük a kísérlet lényegét, ahol az egyik atom elektronjainak egyikét arra kényszerítjük, hogy saját helyétől két energiaszinttel feljebb ugorjék. Kicsit rezegve vár egy pillanatot ennek a magasabb energiaszintnek a peremén, majd leugrik, először a közvetlenül az

átmeneti helye alatt lévő köztes szintre, majd (mindössze 4,7 milliárdod másodpercig tartó várakozást követően) vissza az eredeti helyére. Minden egyes lefelé ugrás során egy-egy foton formájában energia szabadul fel.

Ha nyakon akarunk csípni egyetlen fotont, akkor a gerjesztett kalciumatomot egy detektorral folyamatosan ellenőrizni kell. Ha ez a detektor érzékeli a visszaugrás első lépésében kibocsátott fotont, akkor kinyit egy „kaput”, amely rövid időre lehetővé teszi a fény áthaladását. A kapu nyitva tartásának időtartamát annak megfelelően kell beállítani, hogy mennyi időt tölt az elektron az átmeneti gerjesztett állapotban, így elérhető, hogy amikor az atom kibocsátja a második fotont, az a kapun keresztül bejusson a kísérleti berendezésbe.

A Párizsban dolgozó Alain Aspect és Philippe Grangier ennek a kutatásnak az úttörői közé tartoztak az 1980-as években. Miután megszerezték a fotonjaikat, egy, a fénynyaláb kettéosztására alkalmas, úgynevezett nyalábosztó (félíg áteresztő) tükörrre ejtették őket, amely a fény felét átereszt, a másik felét pedig az előzőre merőleges irányban visszaveri. Ez hasonló ahhoz, ahogyan a kalcitkristály is kettéosztja a fénynyalábot, bár ebben az esetben nincs szó polarizációról. Könnyű belátni, hogy a hullámok ilyen módon kettéoszthatók, és ha ezt egy hagyományos fényforrásból jövő fényhullámmal meg tesszük, akkor a két fénysugár később egyesíthető. Ilyenkor interferenciát hoznak létre, bizonyítva ezzel hullámtermészetüket (ezt a kísérletet mára a nagyon gyenge fényű, a foton energiája töredékének megfelelő intenzitású, hagyományos fényforrásokkal is elvégezték). Ám ha egy részecske érkezik a félíg áteresztő tükörrre, akkor annak vagy vissza kell verődnie, vagy át kell mennie, a kettő egyszerre nem történhet meg.

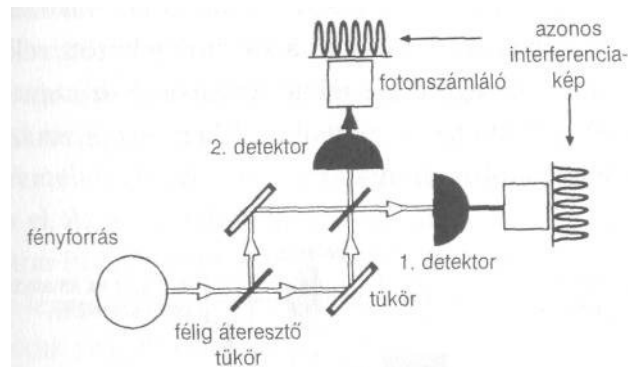
Amikor a félíg áteresztő tükört elhagyó mindkét nyaláb útjába egy-egy detektort helyeztek, és a kísérletet a gerjesztett kalciumatomokból egyenként kicsalogatott fotonokkal végezték, akkor a kísérletezők pontosan az előbbiek szerint várt eredményt kapták. A fotonok mindig vagy az egyik, vagy a másik útvonalon haladtak, soha nem fordult elő, hogy a két detektor egyidejűleg jelzett volna, aminek akkor kellett volna bekövetkeznie, ha a fény mindkét útvonalon egyidejűleg végigment volna.



17. ábra Kettéosztható-e egyetlen foton? Ha a fény valóban részecskék formájában érkezik, akkor a félig áteresztő szűrőt elérő minden egyes fotonnak vagy vissza kell verődnie, vagy meg kell törnie. A kvantumelmélet szerint a detektoroknak tökéletes antikorrrelációt kell kimutatniuk.

Ezzel azonban még nincs vége a történetnek. Ahogy Bohr megjósolta volna, amikor Aspect és Grangier részecskéket keresett, akkor részecskéket is talált. Mi történne, ha hullámokat keresnének, bár „tudják”, hogy a kalciumatom fotonokat bocsát ki?

Ehhez kivették a detektorokat a nyalábok útjából és tükröket tettek a helyükre, amelyek a félig áteresztő tükör által kettéosztott nyalábot újra egyesítették. Ez az elrendezés nagyon hasonló a kétréses kísérlethez. Megállapították, hogy minél több foton haladt keresztül a rendszeren, annál pontosabban kirajzolódott a hullámoktól várható interferenciakép.

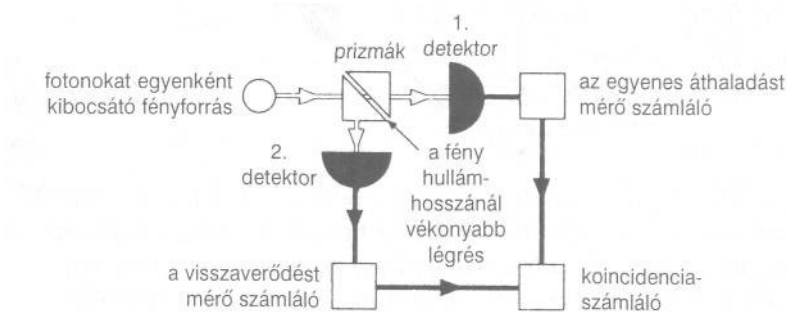


18. ábra Amikor azonban a 17. ábrán bemutatotthoz hasonló kísérletben egy második („háttal elhelyezett”) félig áteresztő tükörrel egyesítjük a fénynyalábokat, akkor azonos interferenciaképet hoznak létre, ami azt igazolja, hogy még az egyesével beengedett fotonok is hullámként viselkednek.

Ugyanazt a fényforrást használva a párizsi kutatócsoport vagy hullámokat vagy részecskéket tudott kimutatni, ami látszólag tökéletesen megfelelt Bohr komplementaritásának. Ám alig száradt még meg a tinta az eredményekről írott tudományos cikken, amikor három indiai fizikus új kísérletet javasolt, amelyben egyetlen foton egy időben részecskeként és hullámként viselkedve lehetne megfigyelni.

A csoport eszmei irányítója Dipankar Home volt, a calcuttai Bose Intézetből. Két kollégája közül Partha Ghose ugyancsak a Bose Intézetben dolgozott, Girish Agarwal pedig a Hyderabad-i Egyetemen. Az indiai javaslat szerint a lényeges újítást az jelentette, hogy a nyaláb szétválasztását nem félig áteresztő tükörrel végezték, hanem két derékszögű háromszög alapú, egymást csaknem érintő prizmaival.

A prizmák átlátszó anyagból készülők, egyszerű, derékszögű háromszög alapú hasábok voltak. Egyetlen ilyen prizmával a befogóra merőlegesen érkező fénysugár a haladási irányával 45 fokos szöget bezáró átfogót belülről elérve teljes visszaverődést szenved, majd eredeti haladási irányára merőlegesen folytatva útját, a másik befogón kilép a prizmából. Ha a két prizma átfogóikkal összeér, akkor négyzet keresztmetszetű üveghasáb keletkezik, amelybe az egyik oldalán merőlegesen belépő fénysugár egyenes irányban áthalad és a szemkötti oldalon visszaverődés nélkül kilép. Ha viszont a két átfogó között vékony rést hagyunk, akkor a fény egy része teljes visszaverődést szenved, más része viszont „alagúthatással” átjut a résen és a másik prizmán keresztül egyenes irányban folytatja útját.



19. ábra A téma egy újabb variációjában a félig áteresztő tükör helyett a nyaláb kettéosztását két, egymástól nagyon vékony légréssel elválasztott prizmával végezték. A fény csak az alagúthatással juthat át a résen, ami feltételezi, hogy hullámként terjed. Ennek ellenére a koincidenca-számláló tökéletes antikoincidenciát jelez, ami a részecskékre jellemző tulajdonság. Sikertelenül ugyanazokat a fotonokat nyakon csípni, amint egy időben részecskeként és hullámként viselkednek.

A trükk csak akkor működik, ha a rés valóban nagyon vékony - kisebb a használt fény hullámhosszánál. Valóban, ha a rés egy hullámhossznál vékonyabb, akkor a fény egy része úgy jut át a résen, hogy észre sem veszi annak jelenlétét. Amint az lenni szokott, most kapnak szerepet a történetben a valószínűségek és a statisztika. Minél vékonyabb a rés, a fény annál nagyobb hányada tud az alagúteffektusnak köszönhetően átszökni. A rés vastagságának nagyon pontos beállításával elérhető, hogy meghatározott hullámhosszon pontosan a fény fele menjen át, és a fele verődjen vissza. A lényeg azonban az, hogy ilyen módon az alagúteffektus révén csak hullámok képesek átjutni a résen. A részecskék nem képesek az alagúteffektusra.

A nyalábosztós kísérletnek ezt a variációját egyetlen fotonnal Yutaka Mizobuchi és Yoshiyuki Ohtake végezték el a hamakitai Hamamatsu Photonics laboratóriumában. A kísérlet hihetetlen pontosságáról némi fogalmat alkothatunk abból az egy körülményből, hogy a rés vastagságát a használt hullámhossz tizede,

azaz néhány tized milliárdod méter pontossággal kellett szabályozni. A detektorokat ismét a prizmából kilépő, két, visszavert, illetve átengedett nyalábban helyezték el. Az egyes fotonok nem vághatók ketté, ezért, mint általában, a foton itt is 50:50 százalék valószínűséggel verődik vissza vagy megy át a légrésnél. Eszerint tehát, ha a két detektor antikoincidenzában működik (vagyis soha nem jeleznek egyszerre), az annak lenne a bizonyítéka, hogy a fény fotonok formájában terjed a kísérletben.

Ám a nyalábot kettéosztó prizmán irányváltoztatás nélkül keresztülhaladó fotonok erre csak az alagúteffektus révén lehetnek képesek. Más szavakkal, tehát a fény hullámként viselkedett. Amikor a kísérletet végrehajtották, a kutatók a fotonok felét találták mindkét csatornában, ami megerősítette, hogy hullámként viselkedtek és az alagúteffektus révén ájtutottak a két prizmát elválasztó résen. Ugyanakkor azt is megállapították, hogy a két detektor tökéletes antikoincidenzában működött, igazolva, hogy a fotonok a résnél részecskeként viselkedtek, és a rés nem felezte meg őket. A kísérletben ugyanazokat a fotonokat figyelték meg, egyszerre (amikor a réshez értek) részecskeként és hullámként viselkedni, ami ellentmond Bohr komplementaritási nézetének. „Három évszázaddal Newton után”, mondta Home, „be kellett látnunk, hogy még mindig nem tudunk a „Mi a fény?” kérdésre válaszolni.” Örömmel mutatott rá Albert Einstein egy megjegyzésére, amelyet 1951-ben egy régi barátjának, Michelangelo Besso-nak írott levelében így fogalmazott meg: „Ötvenévi elmélyült töprengés sem vitt közelebb a „Mik a fénykvantumok?” kérdésének megválaszolásához. Manapság minden Tom, Dick és Harry azt gondolja, hogy tudja a választ - de tévednek.”⁴⁶ Az eredményt új-zélandi fizikusok is megerősítették, akik egy olyan (1994-ig még végre nem hajtott) kísérletet is kiagyalnak, amelyikkel, ha a kvantumelmélet helytálló, egyetlen fotont egyszerre két különböző helyen is ki lehetne mutatni.

Kettős látás

Természetesen a foton valójában nincs két helyen egyszerre. Ez csak így látszik - ami újabb példa a kvantummechanikai helyhez nem kötöttségre, vagyis az Einstein számára oly sok gondot okozó „kísérteties távolhatásra”.

A javasolt kísérlet nem egy, hanem három, a fénysugarat kettéosztó, félig áteresztő tükörrel dolgozik. Miután az eredeti fénysugarat kettéosztjuk, a két különböző irányban továbbhaladó fénysugarakat ismét megfelezzük egy-egy félig áteresztő tükörrel, így végeredményben minden egyes foton négy különböző útvonalon haladhat végig a kísérleti berendezésen. Mind a négy útvonal mentén érzékeny detektorokat helyezünk el, amelyek minden egyes foton beérkezését jelzik, amelyik az eszközön keresztül vezető útja során éppen az adott útvonalat választotta.

46 Mindkét idézet forrása: Dipankar Home és John Gribbin „What is light?” című cikke a New Scientist 1991. november 2-i számában.

Elektromágneses hullámok nyalábja esetében semmi nehézséget nem okoz annak az előrejelzése és megértése, ami a kísérletben történik. Az első tükör két részre osztja a nyalábot, majd a nyalábok által elért következő tükör mindegyiket ismét megfeejezi. A kísérletből tehát négy fénysugár lép ki, mindegyik negyed olyan erős, mint a belépő nyaláb, és a négy sugár tökéletesen azonos fázisban van egymással.

Eddig minden rendben is lenne; azonban a kísérlet nem erről szól. Eddig ugyanis semmi mást nem csináltunk, csak előállítottuk a nyalábok vonatkoztatási rendszerét, amelyet később arra használhatunk, hogy a független fényforrásból a kísérletbe egyenként beküldött fotonokat ezekkel interferáltassuk. Daniel Wallis és kollégái (Aucklandi Egyetem) javaslata szerint az így létrehozott kísérleti elrendezésben egyenként további fotonokat kell az első félig áteresztő tükörrre ejteni. Ezeket a fotonokat tulajdonképpen az eredeti referencianyalábra mérőlegesen kell az első tükörrre ejteni, ám ez nem befolyásolja a tükör működését, ami ezért ezeket a fotonokat is egyenlő valószínűséggel küldi a két csatorna egyikén keresztül a kísérletbe újabban beiktatott, további két tükör valamelyike felé.

Nos, ezen előkészületek után kezdjük el a fotonokat ténylegesen beengedni a rendszerbe. Ha feltételezzük, hogy egyetlen fotont sem engedünk be, akkor arra számíthatunk, hogy (a referencianyaláb fotonjait nem számítva) a berendezésben elhelyezett négy detektor egyike sem fogja fotonok megjelenését észlelni. Ebben azonban tévedünk. Éppúgy, ahogy a fizika törvényei az elektron számára megengedik foton kibocsátását, amelyet azután az elektron rögtön el is nyel, ugyanígy az is lehetséges, hogy a semmiből (vagyis a vákuumból) spontán módon fotonok bukkannak elő, feltéve, hogy ezt követően nagyon hamar el is tűnnek a vákuumban. Ez a kvantummechanikai bizonytalanság egyik megnyilvánulása. Ha ugyanis kijelentenénk, hogy a foton egy adott térfogatban tartózkodásának valószínűsége pontosan nulla, akkor ebből valamire (a negatív állításra) nézve abszolút bizonyosság következne, ami viszont a kvantummechanikában nem megengedett. Ezért kell, hogy legyen bizonyos valószínűsége annak az eseménynek, hogy bárhol, hirtelen előbukkan egy foton. Úgy tűnik, mindaz, amit a kvantummechanika törvényei nem tiltanak, kötelezően meg is jelenik. A vákuumnak ez az úgynevezett kvantumfluktuációja a kvantummechanika világának valóban jól ismert jelensége.

Ennek megfelelően, ha egyetlen fotont sem eresztünk be a kísérleti berendezésünkbe, akkor is előfordulhat, hogy a négy detektor egyike jelez. Jóval ritkábban még az is előfordulhat, hogy két detektor jelez egyszerre, mert mindegyik észrevett egy ilyen, a semmiből előbukkanó, „virtuális” fotont. Ha egyetlenegy valóságos fotont küldünk be a rendszerbe, akkor az a létrehozott útvesztőben csak az egyik útvonalat tudja követni, ezért csak a négy detektor egyikében vált ki jelet - feltéve, hogy részecskeként viselkedik. Ha egyik valóságos fotont a másik után engedjük be a kísérletbe, akkor a detektált fotonok száma egyre nő, ám némelyik „valóságos” foton észlelése véletlenszerűen éppen egybeeshet azzal az eseménnyel, amikor valamelyik másik detektor egy, a

vákuum fluktuációi következtében felbukkanó virtuális fotont érzékel.

Ez azonban nem ilyen egyszerű. A kvantumelmélet tanítása szerint a „valóságos” és a vákuum fluktuációból eredő fotonok összekuszálódnak egymással. Valójában emiatt interferencia lép fel közöttük. Márpedig, amint a kétréses kísérletben már láttuk, az interferencia azt jelenti, hogy a két összetevő erősíti, néha pedig kioltja egymást. A bejövő fotonok tulajdonságaitól függően, az új-zélandiak által kigondolt kísérletben néha több, máskor kevesebb, vagy ugyanannyi koincidenciát kellene észlelnünk. Ha a fotonokat egyenként engedjük be a tervezett négydetektoros elrendezésbe, akkor a kutatók várakozása szerint az egyik detektorpárban nagyszámú koincidenciát kellene észlelnünk, miközben a másik párban a koincidenciák szintje nem emelkedik az egyszerű vákuumfluktuációk alapján várható érték fölé.

Ez egyértelműen igazolná a kvantummechanikai hatások működését, mert nem lenne megmagyarázható kizárólag a klasszikus hullámtulajdonságok, vagy kizárólag a klasszikus részecsketulajdonságok alapján. Egyetlen foton detektorra érkezésének a ténye egyidejűleg annak a valószínűségét is megváltoztatja, hogy a kísérlet másik részén, a második detektornál a semmiből felbukkan egy virtuális foton. A két detektor együttes megszólalása azt az illúziót kelti, mintha a belépő egyetlen, valóságos foton két helyre érkezett volna egyszerre. Valójában az eredeti fotont csak egy helyen, az egyik detektorral észleljük, ám jelenléte hatással van arra, ami valahol másutt, de ugyanabban az időben történik.

Érdekes lenne látni a valóságban is a kísérlet kimenetelét. Megdöbbenő lenne, ha bármilyen, a kvantummechanika előrejelzéseitől eltérő eredményt kapnánk. Ha viszont az eredmények Wallisék várakozásainak megfelelően alakulnak, akkor megerősítik a vákuumfluktuációk előfordulásának valódiságát. Az aktív vákuum elképzelése egyáltalán nem új keletű, mindamellett érdekesebb részletesebben is szemügyre vennünk.

Valamit a semmiért

Nem csak fotonok keletkezhetnek azonban a semmiből a vákuumfluktuációk eredményeképpen. A kvantummechanika szabályai megengedik az energia bizonytalansága és az idő bizonytalansága közötti átjárást. A nagyon könnyű részecskék (mint például a nulla nyugalmi tömegű, de energiát azért hordozó foton) létrehozásához szükséges energia viszonylag hosszú időre is előbukkanhat a semmiből (az időtartam persze csak „viszonylag” hosszú, mindamellett a másodperc kicsiny töredékéről van szó), ám a nagyobb tömegű részecskék (például egy elektronpozitron pár) létrehozásához szükséges energiamennyiség csak arányosan rövidebb időre „vehető kölcsön” a vákuumból. A „semmi” a legpontosabban a látomások kavargó örvényléseként képzelhető el, amelyben a legkülönbélebb részecskék bukkannak fel, majd tűnnek el.

A gondolat végsőig történő túlfeszítésének egyes kozmológusok komolyan vett

elképzelése tekinthető, amely szerint maga az egész Világegyetem is egy kvantumfluktuáció. Minthogy a Világegyetem körülbelül 15 milliárd éves, és valóban meglehetősen sok részecskét tartalmaz, az elgondolás első pillanatban nehezen tűnik befogadhatónak. Ám a gravitációs tér energiája történetesen éppen negatív, ugyanabban az értelemben, ahogy a tömeg energiája pozitív. Ha egy, a Világegyetem tömegének megfelelő energiabuborék a kvantummechanikai léptékben hirtelen létrejött, akkor az elmélet értelmében a tömegek energiája és a gravitációs energia tökéletesen kiegyensúlyozhatja egymást, ezáltal lehetővé téve, hogy ennek a kvantumvilágnak lényegében nulla összenergiája legyen, aminek következtében nagyon hosszú ideig létezzék. A Világegyetem semmiből történő létrehozásának következő lépéseként segítségül kell hívnunk a felfúvódásnak (inflációnak) nevezett folyamatot, amelynek során ez a messze a szubatomi méretek tartományába eső csíra a másodperc törtrésze alatt futball-labda nagyságúra duzzad, majd ezt követően sokkal mérsékeltebb tempóban távolabb.

Egyelőre azonban egyáltalán ne törődjünk azzal, miként lehet a semmiből univerzumokat létrehozni. Inkább ismertetek egy olyan kísérletet, amelyben nátriumatomokra gyakorolt hatása alapján ténylegesen sikerült kimutatni a vákuum működését.

A leghelyesebb, ha a vákuumot nem a „tökéletes semmiként” képzeljük el, hanem az elektromágneses tér különböző állapotai szuperpozíciójaként (más tereket is hozzávehetünk persze, de maradjunk most ennél az egyszerűbb esetnél). A tér különböző állapotai leginkább a különböző magasságú zenei hangokhoz hasonlíthatók, amelyek ugyanazon, megfeszített gitárhúr megpendítésével megszólaltathatók. Ezek (az elektron atomon belüli energiaállapothoz hasonlóan) „energialépcsőt” alkotnak, ahol az egyes lépcsőfokok távolsága az egyetlen foton által felvehető energiának felel meg. Amikor az atom kisugároz egy fotont, akkor semmi más nem történik, csak a vákuumtér energiájának megfelelő frekvenciája egy egységgel megnő, ami éppen megfelel az illető atomban az elektron energiája csökkenésének. A virtuális fotonok átmeneti megjelenése annak felel meg, hogy a tér energiája magától, egyegységnyivel megnő, majd lecsökken - mintha a gitárunk nagyon halkán bár, de teljesen magától, véletlenszerűen különféle zenei hangokat szólaltatna meg.

Elektromosan vezető felület közelében azonban a vákuumtér és fluktuációi módosulnak, mert a tér elektromos összetevőjének a vezető felület közelében nullának kell lennie. Ez kizárja a vákuumtér egyes, egyébként lehetséges aktivitásait, ezért például a vezető közelében elhaladó atom számára a vezetőtől távolabbi oldalon több vákuumenergia áll rendelkezésre. Ennek következtében az atomnak a vezető felület felé kellene vonzódnia (vagy tolódnia, a különbség csak nézőpont kérdése) - tehát az atom és a vezető lemez között vonzóerő ébred.

Az ötlet még az 1940-es évekből származik, ám a jelenséget csak 1993-ban sikerült Ed Hindsnek és munkatársainak a Yale Egyetemen megmérnie. Valami hasonló történik akkor is, amikor két vezető lemezt vákuumban nagyon közel teszünk egymáshoz: a lemezek között módosul a vákuumtér, aminek

következtében a két lemez között ható vonzóerő ébred. Ezt a jelenséget felfedezőjéről, Hendrik Casimir holland fizikusról Casimir-effektusnak nevezzük, létezését már sok esetben, különböző fémekkel végzett mérésekkel sikerült igazolni. A Yale-en végzett kísérlet azonban sokkal érzékenyebb és bonyolultabb.

Ebben a kísérletben a kutatók két kicsiny, arannyal borított üveglemezt használtak. A két lemezt V alakban helyezték el, olyan közel egymáshoz, hogy felső széleik is csak néhány milliomméterre voltak egymástól. A V nyílásában, különböző magasságokban nátriumatomokat küldtek át. A V szárai, vagyis a két lemez közötti tényleges távolságot különböző magasságokban, monokromatikus fénnel létrehozott interferencia segítségével ötmilliárdod méter pontossággal mérték meg. A kísérletezők tehát pontosan tudták, hogy az egyes atomok milyen közel haladnak el a lemezek mellett, és így azt is ki tudták számítani, mekkora erőt fejt ki rájuk a vákuum. Az atomok kilépését a V másik oldalán az atomokról visszaverődő lézersugárzással ellenőrizték. Megállapították, hogy az atomok viselkedése pontosan megfelel a kvantumelmélet alapján felállított előrejelzésnek, és egyértelműen ellentmond annak a viselkedésnek, amit egy azonos szélességű, a klasszikus fizika törvényei szerint viselkedő csatorna esetében várhatnánk az atomoktól.

Ebben a kísérletben nekem főként a mögöttes gondolat egyszerűségének és a gyakorlati megvalósítás finom precizitásának a kombinációja tetszik (valamint az a tény, hogy ez a kísérlet is a kvantummechanika diadalát hirdeti). Több mint 40 év telt el az ötlet felmerülésétől addig, mire a kísérletet valóban sikerült elvégezni, de megérte kivárni. Talán ugyanennyi időbe fog az is telni, mire a jelenleg közkézen forgó számtalan elméletet ellenőrizni lehet, ám ezek a kísérletek, ha egyáltalán valaha is elvégezhetőek lesznek, még látványosabb eredményeket adnak. Gondolnák például, hogy a kvantummechanika még a Star Trek sorozatban előforduló „Küldj fel nyalábként, Scotty!” típusú teleportációt is megengedi?

„Küldj fel a fedélzetre, Scotty”

Emlékeznek még az EPR „gondolatkísérletre”, amelyet azután Alain Aspect és munkatársai ültettek át a gyakorlatba? Kimutatták: ha két foton úgy keletkezik, hogy szükségszerűen különböző a polarizációjuk - de senki nem tudja, melyiknek ténylegesen milyen a polarizációs állapota -, akkor mindvégig valamiféle összekötött állapotban maradnak, jóllehet közben a Világegyetem ellentétes irányban fekvő részei felé repülnek. Ha azonban az egyik foton polarizációját megmérjük, akkor a másik abban a szempillantásban belezuhan a másik állapotba. A részecskéknek ez az egymásba gabalyodása és a távolhatás jelenti a kvantum-teleportáció lelket, legalábbis amint azt Charles Bennett, az IBM Yorktown Heights-i (New York állambeli) kutatólaboratóriumának munkatársa felvetette, és 1993-ban a tekintélyes, Physical Review Letters című folyóiratban publikálta. A tudományos-fantasztikus felhangoktól eltekintve a munka legjelentősebb eleme, hogy a kutatócsoport megmutatta, miként lehet a

kvantummechanika legyőzhetetlennek tűnt problémáját mégiscsak megoldani, méghozzá maguknak a kvantummechanikai módszereknek az alkalmazásával.

A klasszikus fizika törvényeinek engedelmeskedő, hétköznapi világunkban rutinszerű feladat a tárgyak távoli helyekre juttatása. A teleportáció nyilvánvaló analógiája a faxgép, amelynek még az az előnyös tulajdonsága is megvan, hogy az eredeti példányt érintetlenül hagyja a kiindulási helyen, miközben a távoli célállomáson előállítja annak pontos másolatát. Az újságokról és a könyvekről⁴⁷ sok száz vagy sok ezer, lényegében az eredetivel azonos másolat készül, legalábbis ami a kiadványok által tartalmazott információt illeti. Kvantummechanikai szinten azonban a másolatok készítése akadályokba ütközik.

Az első akadály egész egyszerűen a részletesség kérdése. A határozatlansági elv lehetetlenné teszi, hogy mondjuk egy papírlap minden egyes atomjáról minden apró részletet megtudjunk, sőt még csak a nyomtatást alkotó tintafoltok molekuláinak a helyzetét sem ismerhetjük pontosan, ezért a faxon átküldött „másolat” szükségszerűen csak közelítése lehet az eredetinek. Ezen túlmenően, a tárgyak kvantummechanikai szinten történő beszkennelése a kvantummechanika szerint megváltoztatja a tárgy kvantumállapotát - amint láttuk, a dolgok a megfigyelés hatására megváltoznak. Tehát, még ha sikerül is megszerezni a kvantummechanikai rendszer másolatának felépítéséhez szükséges összes információt, ezáltal az eredeti tönkremegy. Ebben az értelemben ez inkább a teleportáció tudományos-fantasztikus irodalomból ismert változatára hasonlít, mintsem a faxgép működésére. A tudományos-fantasztikus írásokban ugyanis rendszerint alapvető követelmény, hogy a teleportáció során az „eredeti” megsemmisüljön - jóllehet számos történet éppen annak a kínos következményeivel foglalkozik, amikor a teleportálóberendezések másolatok előállítása útján megőrzik az emberi lényeket.

A klasszikus információ másolható, de csak fénysebességgel (vagy annál lassabban) továbbítható. A kvantummechanikai információ ezzel szemben nem másolható (egyetlen kvantum nem „klónoozható”, szoktak viccelődni a fizikusok), ám néha, mint például az EPR kísérletben, úgy tűnik, valami egyik pillanatról a másikra eljuthat távoli helyekre is. Bennett és munkatársai az általuk elképzelt teleportációs berendezésben megpróbálták ügyesen ötvözni a klasszikus és a kvantummechanikai sajátosságokat.

A folyamatot két ember, mondjuk Alice és Bob segítségével írják le, akik teleportálni szeretnének egy tárgyat. Ebben a kezdőknek szóló teleportációs leckében a teleportálandó tárgy az egyszerűség kedvéért csupán egyetlen, meghatározott kvantumállapotban lévő elemi részecske - mondjuk egy elektron lesz. A kísérlet elején Alice és Bob egyaránt kap egy dobozt, amelyekben egy-egy egymással összeköttetésben álló részecske található, mintha mindegyikük magával vinné az EPR kísérlet két fotonja közül az egyiket, de anélkül, hogy megmérné a polarizációját. Ezután végrehajtják csillagközi űrutazásukat. Később - talán sok év elteltével - Alice el akar küldeni Bobnak egy másik részecskét. Ehhez

47 Nos, bizonyos könyvekről, még ha éppen erről nem is!

nem kell mást tennie, mint engednie kell, hogy az „új” részecske kölcsönhatásba lépjen a dobozban magával hozott részecskével, majd meg kell mérnie a részecskék kölcsönhatásának az eredményét. A két beavatkozás megállapítja és megváltoztatja az Alice által magával hozott, Bobéval összefüggésben álló részecske állapotát, és ezzel pontosan egy időben és ezzel egyenértékű módon létrehozza és megváltoztatja Bob részecskéjének az állapotát is.

Bob minderről nem tud, hiszen ő akkor éppen valahol a Világegyetem átelles végén tartózkodik. Ezért Alice elküld neki egy üzenetet, talán rádión, talán betesz egy apróhirdetést abba az újságba, amelyet Bob naponta olvas, és közli vele mérése eredményét. Ez az üzenet kizárólag klasszikus információkat tartalmaz, ezért Alice tetszés szerinti számban adhatja fel a hirdetéseket és küldheti a rádióüzeneteket. Végül eljut Bobhoz a hír. Miután birtokába jutott az információnak, hogy milyen kölcsönhatás játszódtott le Alice két részecskéje között, megnézheti saját, kezdetben Alice eredeti részecskéjével összekeveredett állapotú részecskéjét. Annak megfigyelt állapotából megpróbálja „kivonni” saját részecskéje eredeti állapotának hatását. A „kivonás” eredményeképpen pontosan a másik részecske másolatát kell kapnia, vagyis annak a másolatát, amelyet Alice el akart küldeni neki. Alice mindezt úgy hajtotta végre, hogy közben fogalma sem volt róla, hol tartózkodik éppen Bob, sőt még csak nem is beszélt vele közvetlenül. A harmadik részecske eredeti példánya megsemmisült (más kvantumállapotba került), amikor Alice végrehajtotta rajta saját mérését, ezért Bob példánya az egyetlen létező, ellentétben az újság távolban kinyomott példányaival. Bobnak minden joga megvan ahhoz, hogy a nála lévő részecskét az eredetinek tekintse, amelyet a klasszikus üzenet és a távolhatás segítségével továbbítottak neki.

Bennett hangsúlyozza, hogy a leírt eljárás nem sért meg egyetlen fizikai törvényt sem, és csak a fénysebességnél kisebb sebességű teleportációt enged meg - Bobnak ugyanis szüksége van Alice klasszikus módon küldött üzenetére ahhoz, hogy megfejtse saját részecskéje tulajdonságait. Ha túlságosan hamar figyelné meg a saját részecskéjét, akkor ezzel megváltoztatná annak kvantumállapotát, és ezáltal örökre elveszítené annak a lehetőségét, hogy azt helyes módon válassza szét. Alice mérése olyan megváltozásra kényszeríti a másik EPR részecskét, hogy a mérése eredményeképpen születő klasszikus információ lehetővé tegye valaki más számára tökéletes másolat készítését arról, ami Alice oldalán bejutott a kísérletbe, de a folyamat nem mehet végbe pillanatszerűen.”⁴⁸ Ahogyan valaki tréfásan megjegyezte: „ez teleportáció ugyan, de nem úgy, ahogy azt elképzeltük”. Ismerve azonban a kísérletezők zsenialitását, jó esélyünk van arra, hogy még 40 évet sem kell arra várunk, amikor ilyen módon elektronokat tudunk küldözgetni a laboratórium egyik sarkából a másikba, vagy éppen a Föld másik részére (ha nem is a Világegyetem túlsó oldalára). A trükk jópofa, még ha nincsenek is különösebb gyakorlati következményei. Mindamellet lehetnek gyakorlati következmények, ha nem is az elképzelt konkrét esetben, hanem a kvantumvilág további, ezzel esetleg összefüggő rejtélyeinek felderítése szempontjából. Bennett termékeny fantáziája azonban nem rekedt meg a

teleportáció szintjén. Egy másik eredménye sokkal nyilvánvalóbb kapcsolatban áll magának az IBM-nek az érdekeivel - a kvantummechanika segítségével feltörhetetlen titkosítási módszer kifejlesztését célozza.

Kvantumkriptográfia

Természetesen ez az ötlet is kapcsolatban van a teleportációval. A teleportált részecske információt hordoz, ezért a teleportáció egyben üzenet továbbításként is felfogható. Egy másikkal összegabalyodott részecske birtokában egy kém tetszés szerinti másik részecskét küldhet a főnökeinek. Ezenkívül nem kell mást tennie, mint bárki számára érthető nyelven megfogalmazott üzenetben tudatni velük kísérlete eredményét, amikor az „új” részecskét (vagyis a továbbítandó üzenetet) kölcsönhatásba léptette az összegabalyodott részecskéjével. Bárki nyugodtan elolvashatja a nyílt üzenetet, mert az összegabalyodott részecske párja nélkül az üzenet használhatatlan.

Valójában a feltörhetetlen üzenetek kvantumcsatornákon keresztül történő továbbítására vonatkozó kísérletek már a teleportációra vonatkozó munkákat megelőzően megkezdődtek és az 1980-as években széles körben ismertekké váltak. A problémának számos megközelítése létezik, de mindegyik működése valamilyen, véletlenszerű számokból álló „kulcsot” használó kódrendszer létrehozásától függ.

Az egyik fajta kód a kém-történetekből jól ismert. A kódot használó két személy mindegyikének rendelkezésre áll a véletlenszerűen egymás után következő számok azonos sorozata, az úgynevezett „rejtjelalátét”, amelyik akár olyan vastag is lehet, mint a telefonkönyv. Az üzenetet küldő személy az üzenet szövegét számokká alakítja (akár a lehető legegyszerűbb módon, minden betűnek más számjegyet megfelelően, például az A betűk helyett 1-et, a B-k helyett 2-et írva, és így tovább). Ezután kiválasztja a véletlenszerűen felsorolt számokat tartalmazó rejtjelalátét egyik oldalát, és az ott található számokat sorban az üzenet betűit jelentő számok alá írja, majd a megfelelő számokat összeadja. Ezután a rejtjelezett üzenettel együtt elküldi a kulcsot tartalmazó kötet megfelelő oldalszámát, amelynek a számsorát a rejtjelezéshez felhasználta. Az üzenet fogadója a rejtjelezett üzenet számaiból rendre kivonja a kulcs megadott oldalán sorakozó számokat, majd a különbségekből rekonstruálja a titkosított üzenetet. Az eljárást Vernam-féle rejtjelezésnek nevezik, mert az első világháború idején egy Gilbert Vernam nevű amerikai fejlesztette ki. Egyszer használatos rejtjelalátét módszerének is nevezik, mert a kémeket perforált lapokra nyomtatott kulcsokkal látták el, és minden oldalt csak egyszer használták, utána letépték és megsemmisítették (ha a véletlen számok ugyanazon sorozatát, tehát a rejtjelalátét egyazon oldalát több üzenet rejtjelezésére is használták volna, akkor az ismétlődő jelsorozatok alapján lehetséges lett volna a kód feltörése).

Ez a kód nem törhető fel, hacsak nincs meg a rejtjelezett üzenet elfogójának ugyanaz az egyszer használatos rejtjelalátét. Persze az a bökkenő, hogy a kémek

jellemző munkakörülményei között meglehetősen valószínű, hogy a harmadik félnek már sikerült megszereznie a rejtjelalátétet, sőt ami még rosszabb, az is előfordulhat, hogy a kód két felhasználójának nincs tudomása arról, hogy illetéktelen kezekbe jutott a kód, és azzal valaki megfejti a rejtjelezett üzenetet.

A kvantumfizika azonban megoldást kínál erre a problémára. Nincs szükség magukat a kódolt üzeneteket titokban tartani, mert amint Alice Bobnak küldött klasszikus üzenete esetében láttuk, a kvantummechanikai csatornán elküldött információ - ami ebben az esetben a kulcs szerepét játssza - nélkül az üzenet értelmezhetetlen. Csupán arra van szükség, hogy magát a kulcsot - számok véletlenszerű sorozatát - Alice feltörhetetlen módon tudja Bobnak továbbítani. Ez a lehető legegyszerűbben akkor valósítható meg, ha a számok sorozatát kettes számrendszerben adjuk meg, vagyis a számítógépekben használt módon a számsor csak nullákból és egyesekből áll. Ebben az esetben a kulcs bármely rendszer ki-, illetve bekapcsolt állapotai váltakozó sorozataként továbbítható.

Bennett és munkatársai bebizonyították, hogy a feladat polarizált fény használatával végrehajtható. Módszerük szerint Alice fotonok áramát küldi Bobnak, ahol az egyes fotonok polarizációja vagy felfelé mutat, vagy két, megegyezés szerinti (egymással 45 fokos szöget bezáró) irány valamelyike felé mutat, de minden egyes foton polarizációja véletlenszerű. Bob megméri a bejövő fotonok polarizációját, de minden egyes mérésakor a detektorát csak az egyik megbeszélte polarizációs irányba tudja állítani - hogy melyikbe, azt ugyancsak véletlenszerűen választja meg. Minden egyes esetben valamilyen „választ”, azaz mérési eredményt fog kapni, attól függően, hogy a belépő foton a detektor állásához képest függőleges (bináris egyes) vagy vízszintes (bináris 0) polarizációjú. Ezután közli Alice-szal, milyen irányban állt a detektora az egyes méréseknél, aki viszont megmondja, melyik orientáció egyezik azzal ahogyan a fotont elküldte (ezt a beszélgetést akár közforgalmú telefonon is lefolytathatják). Bob és Alice ezek után eldobják az összes olyan mérést, amikor Bob a „rossz” irányú polarizációt választotta, az így megmaradó jelsorozat (0-k és 1-esek sorozata) jelenti a továbbiakban a biztonságos, bináris kulcsot. Mindez így leírva meglehetősen unalmas munkának tűnik, a valóságban azonban a munka unalmas részét számítógéppel lehet végeztetni, amely elvégzi a rabszolgamunkát.

A módszer szépsége abban rejlik, hogy a harmadik fél csak úgy tudja megszerezni a használt kódot, ha „lehallgatja” a kvantummechanikai kommunikációs csatornát, és megméri az áthaladó fotonok polarizációját. Ám a polarizáció megmérése, amint korábban már láttuk, megváltoztatja a polarizációt! Még ha a lehallgatónak sikerül is lejegyeznie minden foton polarizációját, és a listát elküldi Bobnak, az akkor is össze lesz keveredve. Bob és Alice rutinszerű eljárásokkal meg tudnak győződni az illetéktelen behatolás tényéről, például úgy, hogy a kulcs minden ötödik, hetedik vagy akárhányszorosik jelét összehasonlítják anélkül, hogy a teljes kódot fel kellene tárniuk.

Mindez nagyon erőltetett és valószínűtlen példának tűnhet, ám Bennett és kollégái megépítettek egy ezen az elven működő berendezést. El kell ismerni, hogy a prototípusban a kódolt üzeneteket mindössze 30 cm távolságra

továbbították, ám ez azért volt így, mert a készüléket egy asztal tetején építették meg. Elvben a polarizált fotonok optikai szál segítségével több kilométer távolságra is torzulás nélkül továbbíthatók. Végül is, amikor John Logie Baird megépítette az első televíziós képtovábbító rendszert, az is csak néhány méter távolságra küldte a képeket.

A kvantumkriptográfusok már azon gondolkoznak, miként lehetne tökéletesíteni a kulcs továbbításának módszereit. Artur Ekert az Oxford Egyetemen (aki Bennettel is együttműködött) bebizonyította, hogy szükséges véletlenszerű jelsorozat az EPR kísérlet egy változatából is megszerezhető. Az EPR fotonokat egymással ellentétes irányban repítik ki, az egyik nyalábot Alice, a másikat Bob felé, a fotonok pedig megfelelően egymásba vannak gabalyodva, amíg nem hajtanak rajtuk végre mérést. Alice és Bob mindketten megmérhetik a hozzájuk érkező fotonok polarizációját, amihez előre megbeszélt néhány irány közül véletlenszerűen kiválasztott irányban álló detektort használnak. Ezután közforgalmú kommunikációs csatornán elmondják egymásnak, milyen méréseket végeztek, azonban nem árulják el a mérések eredményét. Végül kidobják azokat a méréseket, ahol a detektor különböző állását használták, és a biztonsági kulcsot azokból a mérési eredményekből alkotják meg, amelyeknél mindketten ugyanolyan állásban használták a detektort. Természetesen figyelembe veszik azt a körülményt, hogy az EPR fotonpárok két tagja ellentétes polarizációjú, ha már egyszer a mérés végrehajtották, ezért Bob mindig 1-

et kap eredményül, ahol Alice 0-t és megfordítva. A kvantum kommunikációs csatorna bármiféle „megcsapolására” irányuló kísérlet során az illetéktelen behatoló meg akarja nézni a fotonokat, még mielőtt Bob és Alice elvégeznék a mérést, ám ez a behatolás ebben az esetben is világosan kimutatható zavart okoz a polarizációs állapotokban.

Amint ezekből a példákból is látható, a fotonok kvantummechanikai tulajdonságait ma már nagyon gyakorlati feladatok megoldására kezdik használni - arról persze egyelőre szó sincs, hogy ezek kereskedelmi forgalomban, készen megvásárolható eszközök lennének, amelyekkel kvantummechanikai úton kódokat továbbíthatunk, vagy tárgyakat telepor-talhatunk. A kutató-fejlesztő munka azonban elkezdődött, és elkészültek az első szó szerint asztali prototípusok. A fotonok valóságos volta, Valamint az a tény, hogy hullámként és részecskéként egyaránt képesek viselkedni, ma már egyáltalán nem kérdéses. Miközben egyes kísérleti fizikusok a kvantumvilág egyre bizarrabb tulajdonságait ültetik át a mindennapok mérnöki gyakorlatába, addig más kísérletezők- felrúgva a foton részecsketermészetéről alkotott egyszerű képet - megpróbálnak behatolni a foton „belsejébe”. A kvantummechanikai bizonytalanságnak köszönhetően ma már a foton belsejére is úgy gondolhatunk, mint ahol nyüzsögnek a részecskék. Végül is a foton energiája nagyobb, mint a vákuumé - márpedig ha a vákuum tele lehet virtuális részecskékkel, akkor miért ne lehetne tele ilyenekkel a foton is?

A foton belsejében

Eddig a fotonokat egyszerű objektumokként írtam le, amelyek más részecskékkel csak elektromágneses erő révén képesek kölcsönhatásba lépni. Minthogy a fotonok elektromágnességből „készülnek”, hogyan is lehetne másként? Ám a gravitációtól (amely nagyon gyenge kölcsönhatás, és a szubatomi részecskék világában lényegében figyelmen kívül hagyható) és magától az elektromágnességtől eltekintve létezik két további, a szubatomi világban fontos szerepet játszó kölcsönhatás. A gyenge magerő az atommag viselkedésével áll kapcsolatban, ennek a megnyilvánulása a radioaktivitás és a nukleáris bomlás. Az erős kölcsönhatás viszont az atommagot alkotó részecskéket (a protonokat és a neutronokat) tartja össze a magban. Valójában maguk a protonok és a neutronok is még alapvetőbb részecskékből, az úgynevezett kvarkokból épülnek fel, és az erős kölcsönhatás a kvarkok között működik. Mindez nagyon rendben lévőnek és elfogadhatónak tűnik. Ugyanakkor bizonyos, nagy energiájú fotonok és neutronok kölcsönhatását vizsgáló kísérletekből úgy tűnik, mintha magukra a fotonokra is hatással lenne az erős kölcsönhatás - mintha a fotonok a protonon belüli kvarkokat is „éreznék”, nem csupán a proton elektromos töltését.

Az aktivitás újabb rétegére utaló, gyötrő nyomok arra ösztönözték a Hamburg közelében lévő Desy laboratórium munkatársait, hogy az 1990-es évek elején nagyon nagy energiájú kísérleteket végezzenek fotonokkal. Ezek a kísérletek azt mutatták, hogy a fotonok valójában összetett objektumokként viselkednek, amelyek kvarkok, elektronok, más részecskék kotyvalékából állnak. Ennek pontosan ugyanaz a magyarázata, mint a vákuum kvantumtermészetéé. A foton által szállított energia nagyságának bizonytalansága lehetővé teszi, hogy a foton rövid időre kvark-antikvark párrá (és egyéb dolgokká) alakuljon át pontosan úgy, ahogy a vákuum nullponti energiájának bizonytalansága megengedi (egyebek között) elektron-pozitron párok felbukkanását és eltűnését. Ha a foton akkor ütközik össze egy protonnal, amikor éppen ebben az átmeneti állapotában van, akkor a foton „belsejében” lévő kvarkok közvetlen kölcsönhatásba lépnek a protonban lévő kvarkokkal, aminek következtében a hagyományos módszerekkel kimutatható részecskezápor keletkezik.

Ezek olyan új felfedezések, amelyek következményeit egyelőre még vizsgálják, és amelyek hosszú évekre ellátják munkával a kísérleti fizikusokat. A felfedezés lényege azonban máris világos. Miután megküzdöttünk azért, hogy a hullám-részecske dualizmust használhassuk a fény leírására, most meg kell barátkoznunk azzal az elképzeléssel, miszerint maga a fény is képes átalakulni anyaggá és vissza fénné, jóllehet mindezek a folyamatok a másodperc törtrésze alatt játszódnak le, időtartamuk célszerűen a Planck-idővel mérhető, ami a másodperc 10^{-43} -szorosa.

Bár nagyon különös ez a viselkedés, hozzájárul ahhoz a megnyugtató szimmetriához a fény és az anyag, a hullám és a részecskék között, ami a kvantumvilág oly alapvető jellegzetessége. Végül is már találkoztunk olyan atomokkal, amelyek a kétréses kísérlet egyik változatában, megfelelő körülmények közt „két úton akarnak egyszerre végigmenni”, hogy úgy interferáljanak, ahogyan azt normálisan a fénytől szoktuk elvárni. Bizonyára elegendően nyitott szemléletűnek kell lennünk, ha a fény „hullámainak” meg

akarjuk engedni, hogy ne csak egy meghatározott típusú részecskeként (fotonként) viselkedjenek, hanem megfelelő körülmények közt az atom alapvető építőelemeit alkotó részecskékként. De egyáltalán hogyan viselkednek az anyag részecskéi, beleértve az atomokat is? Megtudtuk, hogy bizonyos értelemben ezek nem is léteznek, legalábbis amikor senki nem néz rájuk - vagyis amikor senki sem végez olyan kísérletet, amellyel megállapíthatná helyüket vagy egyéb jellemzőiket. A kvantummechanikai objektumok az állapotok szuperpozíciójában léteznek, mindaddig, amíg valamilyen külső hatás kiváltja a valószínűségi hullámfüggvény összeomlását. De vajon mi történik akkor, ha folyamatosan figyeljük a részecskét? A Kr. e. V században élt görög filozófus, az éleai Zénón híres paradoxonának modern változatában a megfigyelt atom soha nem képes megváltoztatni a kvantumállapotát mindaddig, amíg a megfigyelés tart. Még akkor sem, ha az atomot szánt szándékkal valamilyen rendkívül instabil, erősen gerjesztett állapotba hozzuk (mint például azokat az atomokat, amelyekkel az egyenként kibocsátott fotonokat akartuk létrehozni a korábban leírt paradox kísérletben). Ha folyamatosan figyeljük az atomot, akkor örökre ebben az instabil állapotban marad, ott rezeg az átalakulás peremén, de csak akkor képes átugrani a stabilabb, alacsonyabb energiájú állapotba, ha éppen senki sem figyel oda. Ez az állítás természetes következménye annak az 1970-es évek végén felmerült elgondolásnak, mely szerint a meg nem figyelt kvantummechanikai objektum nem létezik „részecskeként”. Az elmélet szerint a szemmel tartott kvantumfázék tartalma soha nem kezd forogni. Az 1990-es évek elején végzett kísérletek igazolták ezt az állítást.

Megfigyeljük a kvantumfázekat

Zénón egy sor, a lehetetlent „bizonyító” paradoxonon keresztül megmutatta, hogy a hétköznapi fogalmaink az idő és a mozgás természetéről hibásak. Egyik példájában nyílveszőt lövünk ki az elfutó őz után. Mivel a nyílvesző nem lehet egyszerre két helyen, mondta Zénón, minden egyes pillanatban egy meghatározott pontban kell lennie, valahol a nyíl és az őz között a levegőben. Márpedig, ha a nyílvesző egy meghatározott pontban tartózkodik, akkor nem mozog. Ha a nyílvesző nem mozog, akkor sohasem fogja utolérni az elfutó őzet.

Amikor nyílveszőkről és őzekről beszélünk, akkor Zénón következtetése nyilvánvalóan hibás. A paradoxon segítségével azonban rávilágíthatunk arra, miért hibás ez az okoskodás. A rejtély a differenciál- és integrálszámításnak nevezett matematikai módszer segítségével oldható meg, itt ugyanis nemcsak a nyílvesző pozícióját adjuk meg valamilyen tetszőleges szerinti pillanatban, hanem azt is, miként változik pillanatonként a helye. Egy egészen más szinten a kvantummechanika kijelenti, hogy lehetetlen ismerni a nyílvesző pontos helyét és pontos sebességét egyazon pillanatban (valójában azt is kijelenti, hogy nem létezik pontos időpont, mert magára az időre is érvényes a határozatlansági reláció), ezért elmosódnak a határvonalak az érvelésben, és a nyílvesző mégiscsak folytathatja röptét. Egy Zénónéhoz hasonló érvelés azonban valóban érvényes a néhány ezer berilliumiont tartalmazó „fázékre”.

Az ion egészen egyszerűen olyan atom, amelyről egy vagy több elektronját leszakítottuk. Ennek következtében az ion összességében pozitív elektromos töltést hordoz, emiatt az ionokat elektromos térrel irányítani lehet, sőt valamiféle elektromos csapdával akár egy helyben is tarthatóak - a fazékban. Az Egyesült Államok Nemzeti Szabványügyi és Technológiai Intézetének munkatársai (Boulderben, Colorado államban) megtalálták annak a módját, hogy egy fazéknyi berilliumiont forralni kezdjenek, majd megfigyelték forrásukat, aminek hatására a forrás megszűnt.

A kísérlet kezdetén az összes ion ugyanabban a kvantum-energiaállapotban volt, nevezzük ezt 1. szintnek. Meghatározott frekvenciájú rádióhullámok pontosan 256 ezredmásodpercig tartó impulzusát a rendszerbe küldve az összes ion magasabb energiaállapotba kerül, legyen ez az állapot a 2. szint. Ez felelt meg a fazék tartalma forrásának. De vajon hogyan és mikor mennek át valójában az ionok az egyik állapotból a másikba? Emlékezzünk vissza, hogy a kvantummechanikai rendszerek mindig csak akkor döntenek el, melyik lehetséges állapotukban vannak tulajdonképpen, amikor megmérjük ezt az állapotot - vagyis amikor valaki ránéz az ionokra.

A kvantumelmélet szerint az átmenet nem „mindent vagy semmit” típusú folyamat. A szóban forgó kísérletben éppen azért választották a 256 ezredmásodperces időtartamot, mert ez az a karakterisztikus idő, amely alatt pontosan 100 százalék annak a valószínűsége, hogy egy adott ion átkerül a 2. energiaszintre. Más kvantummechanikai rendszerekben ez a karakterisztikus idő természetesen ettől eltérő (hasonló fogalom például a radioaktív bomlás esetében a felezési idő), de a részecskék általános viselkedése hasonló. Esetünkben 128 ezredmásodperc elteltével (ez az átmenetre jellemző „felezési idő”⁴⁹) azonos a valószínűsége annak, hogy egy adott ion már végrehajtotta az átmenetet, illetve még az 1. szinten tartózkodik. Itt is az állapotok szuperpozíciója figyelhető meg. A 256 ezredmásodperc alatt a valószínűségek folyamatosan változnak a 100 százalék 1. szinttől a 100 százalék 2. szintig. Bármely köztes pillanatban az ion a lehetséges állapotok szuperpozíciójában van, a két szuperponált állapot valószínűsége az előbb mondottak szerint pillanatról pillanatra változik. Amikor azonban megfigyeljük a rendszert, akkor meg kell szűnniük a kevert állapotoknak, a kvantummechanikai rendszernek egyik vagy másik meghatározott állapotában kell lennie; soha nem láthatjuk az állapotok keveredését.

Ha meg tudnánk nézni az ionokat a 256 ezredmásodperc „félidejénél”, akkor az elmélet értelmében minden ionnak választani kell a két lehetséges állapot között, mint ahogy Schrödinger macskájának is abban a pillanatban „el kell döntenie”, hogy él vagy hal-e, amikor belenézünk a dobozba. Mivel a mondott pillanatban egyenlők a valószínűségek, az ionok fele az 1. szint, másik fele a 2. szint „mellett dönt”. A dobozba zárt macska esetével ellentétben ez utóbbi elméleti előrejelzést

49 Az analógia a radioaktív felezési idővel nem pontos, mert esetünkben az átmenetet külső energiaforrásból, a rádióhullámok segítségével „pumpáljuk”. Csak ennek köszönhetően érheti el 256 ezredmásodperc elteltével az összes ion a magasabb energiaszintet.

sikerült - Newton kívánságának megfelelően - tényleges kísérlettel ellenőrizni.

A Nemzeti Szabványügyi és Technológiai Intézet kutatócsoportja szellemes módszert fejlesztett ki annak a pillanatnak a megfigyelésére, amikor az ionoknak el kell határozniuk, hogy melyik energiaállapotban vannak. Ezt úgy valósították meg, hogy egy nagyon rövid lézerfelvillanással bevilágították a kvantumfazékba. A lézernyaláb energiája oly módon felelt meg a fazékban található ionok energiájának, hogy ha a lézersugár a 2. szinten tartózkodó ionnal találkozott, azt változatlan állapotban hagyta, ha viszont az 1. állapotban lévő ionnal ütközött, akkor azt a másodikonál magasabb energiaszintre (3. szint) küldte ahonnan az ion azonnal (kevesebb mint egymilliomod másodperc elteltével) visszazuhant az 1. szintre. Ezen visszaugrás közben ezek az ionok az átmenetre jellemző fotont bocsátottak ki, amelyek detektálhatók és megszámlálhatók. A fotonok száma elárulta a kutatóknak, hány ion tartózkodott az 1. szinten, a megfigyelés pillanatában.

Meglehetősen biztosak lehetünk abban, hogy ha az ionokat 128 ezredmásodperc elteltével „nézzük meg” a lézervillanással, akkor pontosan a felét találjuk az 1. szinten. Ha viszont a kísérletezők a 256 ezredmásodperc alatt négyszer „kukucskálnak be” a fazékba, akkor a kísérlet végén az ionok kétharmada még mindig az 1. állapotban lesz. Ha viszont 64 alkalommal pillantanak be a fazékba (tehát 4 ezredmásodpercenként), akkor a kísérlet végén szinte minden iont az 1. szinten találunk. Bár a rádióhullámok minden tőlük telhetőt megtettek az ionok felmelegítése érdekében, a megfigyelés alatt tartott kvantumfazék tartalma nem volt hajlandó felforrni.

A megfigyelés a következőképpen értelmezhető. Mindössze 4 ezredmásodperc elteltével csupán 0,01 százalék annak a valószínűsége, hogy egy adott ion már átment a 2. szintre. Az ionhoz tartozó valószínűségi hullám már szétterjedt, de legnagyobb részét még az 1. szintnek megfelelő állapot körül koncentrálódik. Ezért magától értetődően a szondázó lézersugár az ionok 99,99 százalékát még az 1. állapotban látja. Ennél azonban több történik. Az ion megfigyelésének művelete arra kényszeríti az iont, hogy válassza meg saját kvantumállapotát, ezért abban a pillanatban az ion tisztán (vagyis az állapotok szuperpozíciója nélkül) az 1. szintre kerül. Bár a kvantummechanikai valószínűségi hullám ebben a pillanatban ismét elkezd szétterjedni, ám újabb 4 ezredmásodperc elteltével megérkezik a következő lézerimpulzus, amely ismét saját kvantumállapota egyértelmű megválasztására kényszeríti, vagyis nagy valószínűséggel ismét egyértelműen visszakerül az 1. szintre. A hullám számottevő mértékű szétterjedésének mindig gátat vet a következő lézerimpulzus érkezése, ami újra az 1. szintre kényszeríti. Az ionok döntő többségének a kísérlet végéig nem volt lehetősége arra hogy háborítatlanul (meg nem figyelve) átjusson a 2. szintre.

Ebben a kísérletben van némi valószínűsége annak, hogy valamelyik ion a lézerjelek közötti 4 ezredmásodperces szünetben - megfigyeletlenül - végrehajtja az átmenetet, erre azonban 10 000 ion közül átlagosan csak egynek van lehetősége. A Nemzeti Szabványügyi és Technológiai Intézetben végrehajtott kísérlet eredménye és a kvantumelmélet előrejelzése közötti nagyon jó egyezés

azonban arra enged következtetni, hogy ha lehetőségünk lenne folyamatosan figyelemmel kísérni az ionok viselkedését, akkor egyiknek sem változna meg az állapota. Ha a kvantummechanika állításának megfelelően a világ valóban csak azért létezik, mert megfigyeljük, akkor annak is igaznak kell lennie, hogy a világ csak azért változik, mert nem tudjuk folyamatosan megfigyelni.

Ez a megállapítás izgalmas megvilágításba helyezi azt a régi filozófiai problémát, miszerint valóban ott van-e egy fa a helyén akkor is, ha senki sem látja. Az egyik, a fa valóságos létezésének folyamatossága mellett szóló, hagyományos érvelés szerint Isten akkor is rajta tartja a szemét a fán, ha azt éppen egyetlen emberi megfigyelő sem nézi. Ám a legújabb bizonyítékok szerint a fa csak akkor képes növekedni és változni, ha Isten néha behunyja a szemét, méghozzá meglehetősen gyakran!

Ha tehát folyamatosan figyeljük az ionokat, akkor egy meghatározott kvantumállapotba „befagyva” láthatjuk őket. Emellett az IBM Almadén Kutatóközpontja (San José, Kalifornia) kutatóinak köszönhetően még az elektronok viselkedését meghatározó valószínűségi hullámokat is „látni” lehet.

Körülkerítjük az elektront

Az elektronhullám működésének megfigyelésére az egyik legszellemesebb példát az 1990-es években Franz Hasselbach és munkatársai dolgozták ki a Tübingeni Egyetemen (Németországban). Ehhez az 1950-es évek közepén, ugyancsak Tübingenben feltalált, elektron-interfero-méternek nevezett berendezés tökéletesített változatát használták.

Az elektron-interferométer tulajdonképpen a kétréses kísérlet egy változata. Az elektronokat egy nyalábban egy negatív elektromos töltésű huzal felé küldjük. A vezeték negatív töltése taszítja az ugyancsak negatív töltésű elektronokat. A berendezést tökéletesen szimmetrikusra tervezték, ezért pontosan 50-50 százalék annak a valószínűsége, hogy a taszítóerő hatására valamely elektron a vezeték egyik vagy másik oldalán repül el. Hátrébb egy pozitív töltésű huzalt helyeztek el, amelyik az eltérített elektronokat maga felé vonzza, és egyetlen nyalábbá egyesíti, függetlenül attól, hogy az első vezeték melyik oldalán repültek el. Végül a detektor egy képernyőn érzékeli az elektronok beérkezését, hasonlóan a kísérlet jól ismert, kétréses változatához.

Ha az elektronokat egyenként küldjük keresztül az interferométeren, akkor a túloldalon elhelyezkedő képernyőn kirajzolódik az interferenciakép, mintha minden egyes elektron két részre szakadt volna, amikor elment az első huzal mellett, majd a második vezetéknél a két félelektron egyesült és interferált egymással (bízom benne, hogy mindez nem lepi meg az olvasót, talán inkább akkor kellene megrökönyödniük, ha azt próbálnám bizonygatni, hogy az elektronok nem így viselkednek). Ez eddig nem más, mint a kétréses kísérlet

másik, bár rendkívül érzékeny változata. A tübingeni kutatók azonban 1992-ben továbbfejlesztették a módszert.

Kísérletükben az eredeti elektron-interferométert kiegészítették egy Wlen-szűrőnek nevezett eszközzel. A Wlen-szűrő két, elektromos töltésű lemezből áll, amelyek között rés van (lényegében tehát egy kondenzátorról van szó), a résben a lemezekre merőleges irányú mágneses tér található. A szűrőn keresztülhaladó töltött részecskék, például az elektronok, az elektromos és a mágneses teret egyaránt „érik”. A két tér erősségét pontosan úgy állítják be, hogy ha a részecske e meghatározott, a beállításnak megfelelő sebességgel mozog, akkor irányváltoztatás nélkül halad át a szűrő lemezei között, minden egyéb esetben viszont mozgásának iránya kissé megváltozik. Nos, a kísérletezők elrontották az eredeti kísérlet szimmetriáját, mert a Wien-szűrőt oly módon helyezték el a két vezeték között, hogy a kettéosztott elektronnyaláb egyik fele a szűrő által kifejtett vonzást érzett, a másik fele viszont nem. Ennek eredményeképpen az elektronok fele gyorsabban jutott át a többinél a berendezésen, így a két fél nyaláb közötti szinkron megbomlott. Emiatt megváltozott az ernyőn előálló interferenciakép, méghozzá pontosan a kvantumelmélet által megjósolt módon - és ez abban az esetben is így történt, ha az elektronokat egyenként engedték át az interferométeren. Ez újabb bizonyíték amellet, hogy az elektronok hullámként viselkednek, bár ez még nem ugyanaz, mintha „látnánk” is magukat a hullámokat. Az utóbbi trükköt csak 1993-ban sikerült megvalósítani, amikor az IBM kutatói először tereltek be egy részecskét egy kvantummechanikai karámba.

Ennek a módszernek, amellet, hogy nyilvánvalóvá teszi a kvantummechanikai hullámok valóságos voltát, fontos gyakorlati következményei is vannak. Lehetővé válik ugyanis az atomok egyenkénti manipulálása és az egyes atomok tetszés szerinti elrendezhetősége egy felületen - ez az úgynevezett „nanotechnológia”, amellyel hamarosan kisebb, gyorsabb és hatékonyabb számítógépek, valamint más, szubmikroszkopikus eszközök készíthetők, amelyek a kutatók meggyőződése szerint egy új ipari forradalom révén gyökeresen átalakíthatják a társadalmat. Az IBM kutatói úgynevezett pásztázó alagútmikroszkópot használva 48 vasatomot tettek le a tökéletesen kör alakú, mindössze 14 milliárdod méter⁵⁰ átmérőjű gyűrű kerülete mentén egy sík rézlemezre. Ez volt az ő „kvantumkarámjuk”. A vasatomok alkotta gyűrűn belül tartózkodó elektron számára ez a gyűrű áthatolhatatlan, kör alakú falat jelent. A kvantummechanika törvényei szerint a gyűrűn belüli elektronhullámok úgy verődnek vissza erről a falról, hogy állóhullám alakul ki - vagyis a fodrozódások időben befagyott mintázata, mintha a gitár húrja a végtelenségig ugyanazon a hangon szólna.

Na végre, mondja a kvantumelmélet. A kvantumkarám belsejének bármely pontjában magával a pásztázó alagútmikroszkóppal meg lehet mérni az elektronsűrűséget, és az eredményeket át lehet alakítani képpé, amelyik megmutatja, milyennek látszana az elektron, ha a szemünkkel közvetlenül megfigyelhetnénk. A kép pontosan olyan, mint a tó fodrozódásáról a kő beleejtése

50 A méter milliárdod részét nanométernek nevezik. A „nano” előtag görög eredetű, jelentése törpe. Ebből ered a nanotechnológia elnevezése is.

után készített pillanatfelvétel - magát az elektront jelentő állóhullámok látszanak rajta.

Az elektronok hullámként viselkedőnek látszanak. Amint a Bevezetőben láttuk, a kétréses kísérlet különböző variációiban még az atomok is hullámként viselkednek. És mégis, érdemes rámutatni arra, hogy a területen kifejtett úttörő erőfeszítése miatt 1989-ben Nobel-díjjal is elismert Hans Dehmeltnek (Washington Állam Egyeteme, Seattle) végül sikerült egyes elektronokat és egyes atomokat mágneses „dobozokba” összefogdosnia (ezek a Zénón paradoxona analógiájára végzett kísérletben használt „kvantumfazékra” hasonlítanak), és megfigyelte, amint részecskéként viselkednek. Nincs lehetőség arra, hogy egy ilyen módon csapdába ejtett elektront közvetlenül „lássunk”. Az 1980-as években azonban Dehmelt és kollégái nemcsak el tudtak csípni egyetlen báriumatomot a módosított „Penning-csapdák” egyikében, hanem az általa kisugárzott kék fénynek köszönhetően ténylegesen le is fényképezték az atomot. Apró, kék pontocskának látszott a fényképen megörökített hatalmas fe-keteség óceánjának kellős közepén. Ha hajlandóak vagyunk elfogadni, hogy a fényképezés ugyanolyan értékű megfigyelés, mintha a saját szemünkkel látnánk valamit (végső soron a Világegyetem legtávolabbi galaxisait és sok egyéb objektumát is kizárólag a fényképfelvételeknek köszönhetően ismerjük), akkor ma már elmondhatjuk, hogy sikerült láthatóvá tenni az egyedi atomokat.

Mindamellett továbbra is lehetséges, hogy a filozófusok és a kvantummechanika értelmezésével foglalkozó szakemberek elvitatkozzanak arról, hogy vajon valóban ott van-e az atom akkor is, amikor éppen senki sem fényképezi le. Talán elég példát sikerült bemutatnom a kvantumvilág furcsa igazságaira, ezért itt az ideje, hogy korábban tett ígéretemhez híven részletesen elmagyarázzam, valójában miről is szól a kvantummechanikai valóság. Mielőtt azonban belebonyolódnék a kvantumvalóság különböző értelmezéseibe - amelyek legtöbbször a kívülálló szemében reménytelenül bonyolultnak és csalódást keltően felfoghatatlannak tűnik - két utolsó, magának a fénynek a különös viselkedésére vonatkozó példán keresztül szeretném világosan összefoglalni, mit is akarok megmagyarázni.

Mikor a foton?

A kvantummechanika elmúlt években mutatott fejlődésének egyik szépségét az adja, hogy a korábban „gondolatkísérletként” megálmodott ötletek rendre megvalósulnak. Annak idején senki sem gondolt arra, hogy ezek bármikor is megvalósíthatóak lesznek, ám most már látványosan bizonyítják a kvantumvilág furcsaságát. E folyamat östípusa természetesen az EPR kísérlet, amelynek a gyakorlati megvalósítás ötlete John Bélitől származik, a tényleges kivitelezés pedig Alain Aspect és csoportja nevéhez fűződik. Ebben az esetben fél évszázadba telt, mire az eredeti gondolatkísérlet valóságossá vált. Más területeken azonban a kísérleti technika fejlődése sokkal gyorsabbnak bizonyult.

John Wheeler, aki Richard Feynman doktori disszertációjának témavezetője volt, az 1970-es évek végén, amikor Texasban, az Austini Egyetemen dolgozott, kiváltképp szellemes ötlettel állt elő. Schrödinger macskája című könyvemben érintettem ezt a késleltetett választásnak nevezett gondolat kísérletet, ám akkor eszembe sem jutott, hogy a könyv megjelenését követő néhány éven belül ez a kísérlet is valóra válhat. Ugyanott megemlítettem a kísérlet egy, a szó szoros értelmében kozmikus változatát, amelyben a távoli kvazárok fénye is szerepet játszott.

Az 1980-as évek közepén senki sem gondolta volna, hogy a kísérletnek ezt a változatát valaha is el lehet végezni, az 1990-es évek közepére azonban jó esélyünk lett arra, hogy a kvazárok fényére vonatkozó mérés hamarosan végrehajtható lesz, pontosan olyan formában, ahogyan azt Wheeler nem egészen húsz évvel ezelőtt megálmodott gondolat kísérletében kifejtette.

A késleltetett választásos kísérlet alapvetően a kétréses kísérlet egy módosított változata. Már tudjuk, hogy ha a fotonokat egyenként eresztjük be a kísérleti berendezésbe, akkor is interferenciamintát hoznak létre a kísérlet túlsó végén elhelyezett ernyőn. Úgy tűnik, mintha minden egyes foton mindkét lehetséges útvonalon végighaladna, majd önmagával interferálna. Azt is tudjuk, hogy ha bármilyen eszközt helyezünk a rendszerbe, amelyikkel ellenőrizni akarjuk, melyik résen megy át ténylegesen a foton, akkor mindig azt tapasztaljuk, hogy az egyes fotonok csak vagy az egyik, vagy a másik résen mennek át, és természetesen ebben az esetben az interferenciakép is eltűnik az ernyőről. A fotonok viselkedése a réseknél attól függően változik, hogy figyeljük-e őket vagy sem.

Wheeler rámutatott, hogy elvben legalábbis lehetséges lenne a fotonok egyes réseken történő áthaladását figyelő detektorokat valahová a rés és a távolabbi ernyő közé tenni. Megpróbálhatnánk akkor megfigyelni, hogy részecskeként vagy hullámként viselkedik-e a foton, amikor már áthaladt a résen, de még nem érte el az ernyőt. A kvantumelmélet szerint ha az egyik vagy a másik útvonalon detektáljuk a fotont, akkor az észlelés hatására az egész kísérletnek összeomlik a hullámfüggvénye, ezért nem alakul ki interferenciakép. Ha viszont a detektort kikapcsoljuk, és úgy döntünk, hogy nem akarjuk „röptében” megfigyelni az elektront, akkor az interferenciakép helyreáll. A fény viselkedése a résnél csak akkor dől el, miután már áthaladt a résen. Nem csak ez dől el utólag, amint arra Wheeler rámutatott, hanem azt is elég csak a foton valamelyik résen történt áthaladása után eldönteni, hogy be- vagy kikapcsoljuk a detektort - innen ered a késleltetett választás elnevezés.

Schrödinger macskájának történetéhez hasonlóan ez a gondolat kísérlet is rávilágít a kvantummechanika abszurditására. A Schrödinger macskájával végrehajtott kísérlettel ellentétben azonban ezt a kísérletet az 1980-as évek közepén két, egymástól függetlenül a Maryland Egyetemen, illetve a Münchener Egyetemen dolgozó csoport végre is hajtotta. Annak a kísérletnek a módosított változatát használták, amelyben félig áteresztő tükör segítségével két részre bontjuk a lézersugarat. A szétosztott nyaláb egyik fele egy fáziseltolónak nevezett berendezésen halad keresztül, ezért kis (de ismert) mértékben eltolódik a fázisa a másik félnyalábhoz képest. Ezután a két nyalábot egyesítik és interferenciaképet

hoznak létre (az eljárás pontos megfelelője annak, amit a tübingeni kísérletben csináltak, ahol elektronokat „osztottak ketté”, és tolták el az egyik rész fázisát). Mindkét nyaláb útjában egy-egy Pockels-cellának nevezett detektort helyeztek el, ezekkel követték a fotonok elhaladását, miközben a kísérleti berendezés legvégén elhelyezett detektorral azt vizsgálták, kialakul-e interferencia vagy nem.

A Pockels-cellák villámgyorsan, mintegy 9 milliárdod másodpercnél rövidebb idő alatt ki-bekapcsolhatók. Az egyes fénynyalábok útvonalának hossza a kísérleti berendezésben körülbelül 4,3 méter volt, ezt a távolságot a fénysebességgel száguldó fotonok 14,5 milliárdod másodperc alatt teszik meg. Eszerint tehát a Pockels-cellákat be (vagy ki) lehetett kapcsolni, miután a fény keresztülhaladt az eredeti sugarat két nyalábra osztó félig áteresztő tükrön (természetesen az érzékelő be-, illetve kikapcsolásáról a vezérlő számítógép véletlenszerűen, emberi közbeavatkozás nélkül döntött). Mindkét kutatócsoport megállapította, hogy az eredmények összhangban állnak a kvantumelmélet előrejelzéseivel. Amikor a detektorok be voltak kapcsolva, a fény fotonokként viselkedett, minden egyes foton vagy az egyik, vagy a másik útvonalon haladt végig, tehát nem jött létre interferencia (a 4,3 méter hosszú fénynyaláb természetesen rengeteg foton tartalmaz, amelyek mindegyikének még a detektor elérése előtt „el kellett döntenie”, hogyan akar viselkedni). Amikor viszont a detektorok ki voltak kapcsolva, akkor a fény hullámként viselkedett, még akkor is, amikor a fotonokat egyenként engedték a félig áteresztő tükrökre. Ilyenkor a fény kimutathatóan mindkét útvonalat egyidejűleg bejárta, és határozott interferenciát hozott létre. A fotonok viselkedése a félig áteresztő tükröknél attól függően alakult, hogy a továbbiakban miként szándékoztuk megfigyelni őket, még akkor is, ha abban a pillanatban még el sem döntöttük, milyen megfigyelést kívánunk végrehajtani! A leírtak látványos példát szolgáltatnak arra, miként válik valósággá egy eltervezett gondolkísérlet. A kísérlet elvégzése egyértelművé tette a fotonok képességét, miszerint előre megérzik, hogy a detektort ki vagy be szándékozzunk-e kapcsolni, vagyis milyen állapotban lesznek a detektorok, mire a foton odaérkezik. Mivel a két esemény (a „döntés” és a detektor elérése) közötti időtartam csekély, mindössze néhány milliárdod másodperc, nem kell különösebben aggódnunk az ilyen rövid távú „jövőbelátás” miatt. A helyzet akkor fordul komolyabbra, amikor Wheeler kísérletének az 1980-as évek elején kigondolt, kozmikus változatát vesszük szemügyre.

Wheeler rámutatott, hogy a gravitációs lencse néven ismert (relativisztikus) csillagászati jelenség a kétréses kísérlet kozmikus léptékű változataként fogható fel. Ebben az esetben a két különböző útvonalat bejáró fénysugárról beszélünk. Abban az időben még senki sem tudta bizonyosan, hogy a távoli kvazárok esetében a gravitációs lencse jelensége kimutatható lesz-e a földi távcsövekkel, azóta azonban számos példát sikerült felfedezni a jelenségre. Arról van szó, hogy a nagyon távoli, tőlünk sok ezer millió fényévre fekvő kvazárok fénye kozmikus utazása közben elhalad egy közelebbi, éppen a látóirányba eső galaxis mellett (fényévnek a fénysugár által egy év alatt megtett távolságot nevezzük, nagyságának érzékeltetésére csak arra emlékeztetünk, hogy a 150 millió kilométer távolságban lévő Nap fénye nem egészen 500 másodperc alatt elér bennünket). Ha a galaxis és a távoli kvazár véletlenül pontosan ugyanabban az

irányban fekszenek, akkor - mivel a galaxis gravitációs tere (az általános relativitáselmélet értelmében) elgörbíti a közvetlenül mellette elhaladó fénysugár pályáját - a kvazárról érkező fotonoknak választaniuk kell, melyik útvonalon kívánnak a galaxis mellett elhaladni (hasonlóan ahhoz, amint az egyetlen elektronok is választania kellett az elektron-interferométerben, hogy a feltöltött huzal melyik oldalán akar elmenni). Ennek következtében a Földről nézve megkettőződni látjuk a kvazár képét, tehát a galaxis mindkét oldalán előtűnik ugyanannak a kvazárnak a képe.

Elvben lehetséges lenne a két képet egyesíteni, és a kvazár két különböző útvonalon érkező fényét interferáltatni egymással. Ez lenne a „bizonyíték” arra, hogy a fény hullámként viselkedik, miközben a galaxis mindkét oldalán elhalad. Ugyanakkor Pockels-cellákkal (vagy valamilyen hasonló módszerrel) lehetséges lenne megfigyelni a kvazár két képét alkotó fotonok Földre érkezését. Ebben az esetben a kvantummechanika azt állítja, hogy miután a Pockels-cellákkal megfigyeltük a fotonokat, azok nem fognak interferenciaképet létrehozni. Ez viszont a fény részecskeként viselkedésére jelentene „bizonyítékot”, azt állítva, hogy minden egyes foton a galaxisnak vagy az egyik, vagy a másik oldalán megy el.

A gondolkísérlet gyakorlati megvalósítását illetően azonban van egy bökkenő (emiat nem akadt senki 1980-ban, aki azt gondolta volna, hogy ez valaha is több lehet pusztá gondolkísérletnél). Bár fel tudjuk fogni a kvazár bármelyik képét alkotó fotonokat, a fénysugarat elgörbítő galaxis nagy kiterjedése elmosódottá teszi a két sugár információtartalmát. Minden fényforrásra jellemző egy úgynevezett „koherenciaidő”, amelyen belül a forrás által kibocsátott fénysugarak még azonos fázisban terjednek. Hosszabb időtartam esetén a hullámok közötti szinkron véletlenszerű és megjósolhatatlan módon megszűnik. A galaxis mellett eljövő két fénynyaláb által befutott távolságok közötti különbség akár több fényhét is lehet, a néhány hét viszont sokkal nagyobb a kvazárból származó fény koherenciaidejénél. Emiat a fény információtartalma összezavarodik, és itt a Földön többé már nem lehet interferenciamintázat létrehozására felhasználni.

A csillagászokat 1993-ban azonban egy újabb felfedezés hozta lázba, melynek során a gravitációs lencsejelenség egy új fajtáját sikerült felfedezni. Ez olyankor következik be, amikor a saját Tejútrendszerünkhöz tartozó, nagy tömegű, sötét, láthatatlan égitest halad el egy másik galaxis valamely csillaga előtt, aminek következtében a csillag fénye pislákolni” kezd, amint a gravitációs lencsehatás által létrehozott különböző képek elhaladnak a látóterünkben. A szóban forgó, nagy tömegű égitest valószínűleg nem nagyobb a Jupiternél, és a két kép között létrejövő útkülönbség jóval kisebb, mint a galaktikus gravitációs lencse esetében. A megfigyelési módszerek és megfigyelőeszközök tökéletesedésével lehetségessé kellene válnia, hogy megfigyeljük a távoli csillagok, sőt esetleg kvazárok fényében az ily módon létrejövő interferenciamintát. Márpedig innen már csak egy kis lépést kellene megtenni ahhoz, hogy a kísérleti elrendezésben elhelyezzük a Pockels-cellákat, és ezzel megakadályozzuk az interferenciát.

Az elmondottak jelentőségét akkor fogjuk fel a maga teljességében, ha arra

gondolunk, hogy a távcsövünkre erősített detektorba érkező fotonok talán egymilliárd évvel ezelőtt indultak útnak a tőlünk 1022 km távolságban lévő kvazárból. Két útvonal közül „választhattak”, ha a Földre akartak érkezni. Jöhettek az egyik útvonalon, jöhettek a másikon, vagy rejtélyes módon két részre válva jöhettek mindkét úton egyszerre. Ám úgy tűnik, mintha az, hogy egymilliárd évvel ezelőtt, 1022 km távol tőlünk melyik lehetőséget választják, attól függ, hogy talán valamikor az 1990-es évek végén vagy a 2000-es évek elején egy csillagász a Földön rákapcsol-e egy Pockels-cellát a kvazár fényét megfigyelő távcsövére vagy nem.

Wheeler a következőképpen magyarázza az ebben a képben rejlő félreértést:

Tévedés azt képzelni, hogy a fotonnak bármilyen fizikai formája lenne, mielőtt a csillagász megfigyelte volna. Akár hullám, akár részecske, akár mindkét úton egyszerre jött el a galaxis két oldalán, akár csak az egyikén a kettő közül. Valójában a kvantummechanikai jelenségek soha nem hullámok vagy részecskék, hanem valamilyen eredendően definiálatlan valamik, egészen addig a pillanatig, amíg meg nem figyeljük őket. Bizonyos értelemben igaza volt George Berkeley brit püspöknek és filozófusnak, amikor két évszázaddal ezelőtt kijelentette: „létezni annyi, mint érzékelve lenni”⁵¹

Nem vagyok azonban bizonyos abban, hogy ez valóban segít. Bár megpróbálkozunk a jelenség leírásával, az azért nyilvánvaló, hogy a késleltetett választásos kísérlet kozmikus változatában valami nagyon furcsa dolog történik. Úgy tűnik, mintha az egész Világegyetem előre „tudná”, milyen kísérletet szándékozik egy emberi lény végrehajtani valamikor az elkövetkező évek során, talán valahol Chile egyik hegycsúcsán. Wheeler egészen annak felvetéséig merészkedett, hogy talán az egész Világegyetem csak azért létezik, mert valaki megfigyeli - vagyis egészen a mintegy 15 milliárd évvel ezelőtt bekövetkezett Ősrobbanásig visszamenőleg minden határozatlan maradt, mindaddig, amíg senki nem figyelte meg. Ez alapvető kérdéseket vet fel (hasonlóakat ahhoz, amilyenek a dobozba zárt macskával végzett kísérlet kapcsán felmerültek) arra vonatkozóan, hogy mely teremtmények minősülnek megfelelőnek ahhoz, hogy észrevegyék saját maguk (és a Világegyetem többi részének) létezését, és ezáltal előidézzék a kozmikus hullámfüggvény összeomlását. Többek közt ezekkel a kérdésekkel szeretnék a következő fejezetben foglalkozni, előbb azonban lássunk egy rövid kitekintést az összeomló hullámfüggvények világába, nevezetesen egy olyan gondolat-kísérletet, amely szerint a megfigyelés hiánya is előidézhetheti egy rendszer hullámfüggvényének az összeomlását.

A kvantumvilág furcsaságának ez a pompás példája még az 1950-es évek elejéről származik, és „Renninger negatív eredményű kísérleteként” vált ismertté (a nevét kiötlőjéről, Mauritius Renninger német fizikusról kapta). Ez az egyik legkönnyebb példa a kvantumok különösségének a megértésére, de nem a magyarázatára.

A gondolat-kísérlet általam kissé módosított változatában képzeljünk el egy forrást,

51 Scientific American, 1992. július, 75. oldal.

amelyik véletlenszerű irányban egyetlen kvantumrészecskét bocsát ki (a közönséges, radioaktív atommagok pontosan ugyanezt teszik, tehát a feltevésben nincs semmi különleges). Helyezkedjék el a forrás egy nagy, üres gömb középpontjában. A gömb belső felületét borítsa olyan anyag, amelyik felvillan abban a pontban, ahol a forrás által kibocsátott részecske eléri. Az események elfogadott kvantummechanikai leírása értelmében amikor a forrás kibocsát egy részecskét, akkor tulajdonképpen egy kvantummechanikai valószínűségi hullám kezd el szétterjedni a térben, a forrás körül minden irányba egyenletesen, hiszen a forrás bármely irányba azonos valószínűséggel bocsátotta ki a részecskét. Amikor a valószínűségi hullám eléri a gömbhéj belső felületét, akkor azonban csak egyetlen felvillanást látunk, amint a hullámfüggvény egyetlen pontba omlik össze. A részecske csak akkor „valóságos”, ha megfigyelik - vagyis amikor kiváltja a felvillanást -, de nem az, amíg a forrástól a gömbfelületig halad.

Ez eddig meglehetősen egyszerű. Most azonban képzeljük el, hogy félúton a forrás és a gömbhéj között félgömb alakú árnyékolóernyő helyezkedik el, amelyik a külső gömbhéjnak pontosan a felét eltakarja a forrás elől. A külső gömbhéjhoz hasonlóan ennek a félgömbnek a belső felületét is szcintilláló anyag borítja, amely felvillan a forrásból érkező részecske hatására. Mi történik ebben az esetben, ha a forrás kibocsát egy részecskét?

A kísérlet lehetséges kimeneteleire nagyon egyszerű kvantummechanikai leírás adható, amely csak két végállapottal számol. Nem érdekel, hogy a belső vagy a külső gömbhéjnak pontosan melyik pontjában idézi elő a részecske a felvillanást, csupán arra vagyunk kíváncsiak, melyik felületen történik a felvillanás. A részecske vagy a külső gömbhéjat találja el, és ott kelt felvillanást, vagy a belső félgömb felületébe csapódik, és akkor ott látjuk a villanást. A leírt kísérleti elrendezésben a kísérlet fenti két kimenetelének pontosan azonos a valószínűsége. Tételezzük most fel, hogy a forrást ismét egy részecske kibocsátására készítjük. A hagyományos kvantummechanikai leírás szerint ebben az esetben is gömbszimmetrikus valószínűségi hullám kezd szétterjedni, amely minden irányban egyenletesen terjed szét. Várjunk ezután annál valamivel hosszabb ideig, mint amennyi idő alatt a részecske eléri a belső félgömböt, de annál rövidebb ideig, mint amennyi idő alatt a külső gömbhéjat elérné.

Tételezzük fel, hogy eddig a pillanatig nem észleltünk felvillanást a belső félgömb felületek egyetlen pontjában sem. Ebben az esetben biztosan tudjuk, hogy a kísérlet végeredményeképpen a külső gömbfelületen fogunk felvillanást látni - hiszen a forrás a részecskét nyilván nem a megfelelő irányban bocsátotta ki ahhoz, hogy az elérje a belső félgömb valamelyik pontját. Eddig 50-50 százalék volt annak a valószínűsége, hogy a felvillanás az egyik vagy a másik gömbön következik be, most azonban a kvantummechanikai hullámfüggvény összeomlása következtében egyszeriben 100 százalék lett annak a valószínűsége, hogy a felvillanás a külső gömbhéj valamelyik pontjában következik be. Mindez azonban anélkül történt, hogy az észlelő bármit is megfigyelt volna. A hullámfüggvény összeomlása pusztán a megfigyelő arra vonatkozó tudásának köszönhető, ami a kísérletben lejátsszódik. Ha a megfigyelő elég intelligens, akkor kikövetkezteti, mi történik, illetve mi történt volna, ha a részecske a belső félgömb felé tartott volna (tehát egy macska például nyilvánvalóan nem elegendően okos ahhoz, hogy a

szükséges logikai művelettel előidézze a hullámfüggvény összeomlását). Ilyen körülmények között tehát a megfigyelés hiánya váltja ki a hullámfüggvény összeomlását, méghozzá ugyanolyan hatékonyan, amint azt a tényleges, megfigyelés tette volna. Legalábbis ezt mondja a koppenhágai értelmezés.

A kvantummechanika hagyományos, koppenhágai értelmezésének kulcsfontosságú tényezője a megfigyelő - de nem akármilyen, hanem csakis az intelligens megfigyelő - központi szerepe. Ezt a felfogást azonban nagyon nehéz igazolni, ezt legfeljebb végső mentsvárnak tekinthetjük, ha mindenáron úgy össze akarjuk tákolni az elméletet, hogy azt a kvantummechanika „szakácskönyveként” lehessen használni. Ebben az esetben a receptek segítségével elérhetünk bizonyos eredményeket, megoldásokat, azonban anélkül, hogy megértenénk, mi megy végbe, mialatt kisül a kvantumkalács.

Bár a legtöbb fizikus több mint fél évszázadon keresztül boldog volt, hogy a recepteket alkalmazhatta, miközben nem különösebben izgatta őket, mi történik a kvantumkonyhában, mindamellett mindig előfordultak a kvantumvilág alternatív értelmezései. Bár az alternatív értelmezésekről mindvégig élénk vita folyt, sajnos azok egészen a közelmúltig semmivel sem bizonyultak kevésbé rossznak, mint a koppenhágai értelmezés. Ennek ellenére érdemes röviden áttekinteni ezeket a reményvesztett próbálkozásokat, csak azért, hogy lássuk, mi mindent kell tudnia a kvantumelmélet megfelelő értelmezésének. Így legalább lélekben felkészülhetnek arra a lenyűgöző pillanatra, amikor könyvem végén feltárom az Önök számára az egyik ilyen kiváló elméletet.

4. Kétségbeesett próbálkozások

A kvantumelmélet egyik legfigyelemreméltóbb tulajdonsága, hogy számos különböző értelmezés van forgalomban arra nézve, mit is „jelent valójában” az elmélet. Az elméletek legtöbbje - filozófiai háttérüket tekintve - kölcsönösen ellentmond egymásnak, ám közös tulajdonságuk, hogy a már elvégzett kísérletek eredményét pontosan értelmezik, sőt helyes következtetések levonását teszik lehetővé a jövőbeli kísérletek kimenetelére vonatkozóan. Az összes értelmezés eleget tesz tehát a jó elméletekkel szemben Newton által támasztott követelménynek! A természettudomány egyetlen más területén sem tapasztalhatunk ehhez foghatót - nem létezik például a XX. századi fizika másik nagy elméletének, Einstein általános relativitáselméletének fél tucat vagy még annál is több különböző „értelmezése”.

A kvantumelmélet értelmezéseinek széles választéka tulajdonképpen arra hasonlít, ahogyan a két- (vagy több-) réses kísérletben a foton előtt is feltárul a bejárható útvonalak széles választéka. Úgy tűnik, mintha a fotonok képesek lennének a kísérletben lehetséges mindkét utat egyidejűleg bejárni, jóllehet hétköznapi fogalmaink szerint a két lehetőség kölcsönösen kizárja egymást. Hasonlóképpen, úgy tűnik, mintha a kvantumelmélet megengedné a számos

különböző, egymást kölcsönösen kizáró értelmezés lehetőségét. Ahogyan a foton is bejárhatja a kísérletben az egymást kölcsönösen kizáró két útvonalat, ugyanúgy bizonyos értelemben ezen értelmezések mindegyike helyes lehet.

Ahelyett, hogy megpróbálnák a szóba jövő értelmezések közül az „egyetlen helyeset” kiválasztani, egyes fizikusok (mindenekelőtt Heinz Pagels, a The Cosmic Code szerzője) azzal érvelnek, hogy az értelmezések mindegyikéből valamivel többet tudhatunk meg a kvantumvilágról. Ezeket az értelmezéseket stílszerűen az állapotok szuperpozíciójában lévőnek tekinthetjük. Néhány szakember valóban elég széles látókörű ahhoz, hogy elfogadja ezt az álláspontot. Ezzel szemben azt tapasztalhatjuk, hogy jó néhány magányos fizikus (akik egyáltalán nem is törődnek azzal, hogy ilyen gondolatokkal terheljék az agyukat) makacsul ragaszkodnak ahhoz az álláspontjukhoz, miszerint kizárólag az ő értelmezésük a helyes, és ennek megfelelően az összes többi értelmezés „nyilvánvalóan” hibás.

Ennek a vitának a természetét - ha egyáltalán helyénvaló vitának nevezni ezt a tudományos sárdobálást - az 1980-as évek közepén élvezetes formában a nyilvánosság elé tárták. Paul Davies (aki akkoriban a Newcastle upon Tyne-i Egyetemen volt a fizika professzora) és Julian Brown (a BBC rádió producere) egyesítették erőiket és rádiósorozatot készítettek a BBC-ben a kvantummechanikáról. Interjút készítettek a kor nyolc legkiválóbb kvantumfizikusával, és kikérték a véleményüket arról, miként lehetne a kvantummechanika ismert rejtélyeit megoldani. Az adássorozatot követően az interjúk teljes szövege - néhány bevezető tanulmánnyal együtt - megjelent a The Ghost in the Atom című kötetben. Ebben a megszólaltatott szakértők ünnepélyesen kijelentik, hogy csak egy bizonyos értelmezés a helyes, az összes többi lehetetlen. Sajnos abban azonban már nem értettek egyet, melyik az egyetlen helyes értelmezés. Mindannyian teljesen biztosak magukban, és néhány kivételtől eltekintve mindannyian a valóság más-más változata mellett szállnak síkra, míg a többit elvetik. A könyvből nemcsak a különböző értelmezések, hanem maguk az értelmezések készítői között tátongó szakadék is minden korábbinál nyilvánvalóbban és felfoghatóbban kiviláglik. A helyzet érzékeltetése érdekében ebben a fejezetben rendszeresen idézek a nevezett könyvből.

Nem szándékozom azonban teljes részletességgel bemutatni a kvantumvalóság minden egyes értelmezését, inkább csak összefoglaló áttekintést szeretnék adni a maréknyi legfontosabb vitázó fél álláspontjáról. Személyes véleményem szerint egyikük sem ad kielégítő magyarázatot a világ működésére, bár Pagelsszel egyetértve úgy gondolom mindegyikük hasznos betekintést enged a jelenségekbe. Amint a következő fejezetben részletesebben is kifejtem, a világ elméleti „modelljének” nem szükségszerűen kell tökéletesnek lennie ahhoz, hogy hasznos legyen. Márpedig ez sehol sem látszik világosabban, mint a koppenhágai értelmezés példáján, amely nyilvánvalóan hibás, mégis jóval több, mint fél évszázadon keresztül hasznos gyakorlati alapként szolgált a kvantummechanika műveléséhez.

Koppenhága összeomlása

A koppenhágai értelmezés két körülménynek köszönhetően vált a kvantummechanikai valóság „hivatalos” magyarázatává. Az egyik egy történelmi baleset, a másik pedig a XX. század egyik legnagyobb matematikusának egy ostoba tévedése. A történelmi véletlent az jelentette, hogy ez volt az első működőképes értelmezés, legalábbis abban az értelemben, hogy recepteket adott azoknak a kvantumszakácsoknak a kezébe, akik nem akarták a mélyebb értelmű rejtélyek megoldásával és a filozófiai problémákkal gyötörni magukat. E receptek alapján viszont a kvantumszakácsok ki tudták sütni saját kvantumkalácsaikat. (A koppenhágai értelmezés sikeréhez az is hozzájárult, hogy egy olyan erélyes személyiség vette pártfogásába, mint Niels Bohr, aki csak ritkán maradt alul a vitákban). Márpedig ha a koppenhágai értelmezés ezen a gyakorlatias szinten jól működött, akkor csak kevesen zavartatták magukat mélyebb következményei miatt.

Ezt a hivatalos pozícióját az értelmezés még az 1980-as évek közepén is tartotta, méghozzá nem is csak a filozófiai kérdések iránt kevésbé fogékony kvantumszakácsok körében. Sir Rudolf Peierls, az 1907-ben Berlinben született fizikus, aki a kvantummechanika számos úttörőjével dolgozott együtt, mielőtt letelepedett Angliában, világosan kifejtette ezt a nézetét a *The Ghost in the Atom* kötetében. „Ellene vagyok a koppenhágai értelmezés kifejezésnek”, mondta, „mert ez úgy hangzik mintha a kvantummechanikának számos értelmezése lenne. Pedig csak egy van. A kvantummechanika csak egyetlenegyféleképpen érthető meg.”⁵² Így beszél egy a régi iskolához tartozó fizikus, aki Niels Bohr, Werner Heisenberg és Max Born tanítványaként nevelkedett.

Mostanra az olvasónak már világos képet kellett kapnia mindarról, amiről a koppenhágai értelmezés szól - a komplementaritás és a valószínűségi hullámok kombinációjáról, továbbá a hullámfüggvény összeomlásáról - ezért nem tartom szükségesnek ezek elismérlését. Arra azonban emlékeztetnék, hogy a három pillér egyikét, a komplementaritás Bohr-féle értelmezését, újabban megkérdőjelezték azok a kísérletek, amelyek tanúsága szerint egyetlen foton, ugyanabban a kísérletben egyidejűleg képes részecskeként és hullámként is viselkedni. Emlékezzünk vissza arra is, hogy a koppenhágai iskola felfogása szerint a kvantummechanikai objektumoknak, mint például az elektronnak vagy a fotonnak, egyáltalán nincsenek tulajdonságaik, például helyük és impulzusuk, kivéve azokat az eseteket, amikor ezeket a tulajdonságokat megmérjük. Nem arról van szó, hogy nem tudjuk, mekkora a szóban forgó fizikai mennyiségek értéke, hanem az elmélet szerint ezek a tulajdonságok nem is léteznek mindaddig, amíg valaki meg nem figyeli őket.

Ez azonban ráirányítja a figyelmünket a koppenhágai értelmezéssel kapcsolatos legfontosabb problémára. Mikor (vagy hol) következik be a hullámfüggvény összeomlása? Képes-e egy Geiger-számláló kimutatni, amikor egy atom a radioaktív bomlás során kibocsát egy részecskét, és előidézheti-e például a

detektor ennek analógiájára a Schrödinger-féle „macska a dobozban” kísérletben az egész rendszer hullámfüggvényének összeomlását? Látszólag nem, különösen a Renninger által kigondolt kísérlethez hasonlóak fényében, ahol a mérés hiánya a felelős a hullámfüggvény összeomlásáért! De akkor vajon alapvető jelentőségű-e a hullámfüggvény összeomlása szempontjából a tudatosság, sőt az intelligencia?

A filozofikus gondolkodásra hajlamos fizikusok már a koppenhágai értelmezés megszületése óta azon töprengenek, hol lehet meghúzni a határvonalat a hétköznapi világ és a kvantumvilág között. Koppenhága szigorú hívei szerint az, amit mi mondjuk egy elektron fizikai tulajdonságainak tartunk, az nem több (vagy nem kevesebb), mint az elektron és a mérőműszer közötti viszony, ezért ezek a tulajdonságok nem csak az elektronhoz, hanem az egész rendszerhez „tartoznak”. A Brit Tudományfejlesztési Társaság által szervezett, a Keele Egyetemen 1993 augusztusában tartott előadásában Dávid Mermin amerikai fizikus nagyon találó analógiát dobott be a jelenségek magyarázatára.

A pszichológusok és a biológusok élénken vitatkoznak az intelligencia természetéről, ezen belül elsősorban arról, hogy mekkora része tekinthető örököltnak, és mekkora a környezeti hatások és az oktatás révén szerzett rész. Ezért kidolgozták az úgynevezett IQ-teszteket, amelyekkel megmérhető az emberi lények „intelligenciahányadosa”. Bár régebben még sokan úgy gondolták, hogy az IQ-teszt valóban alkalmas az intelligencia mérésére, ma már sokkal inkább azt gondoljuk, hogy az IQ-teszt az intelligencia helyett az IQ-tesztek megoldási képességét méri. A vele született intelligencia egyik tényezőként közrejátszhat ennek a képességnek a kialakulásában, ám nem ez az egyetlen összetevője. A kísérlet (hogyan old meg valaki egy IQ-tesztet) eredménye magának a kísérletnek a természetétől függ (triviális példa, ha a tesztet oroszul írták, és mi nem tudunk oroszul, akkor nincs túl sok esélyünk a jó eredményre).

Hasonlóképpen, ha mondjuk azt határozzuk el, hogy egy elektron impulzusát akarjuk megmérni, akkor tulajdonképpen csak azt tudjuk megmérni, hogy milyen mértékben képes az elektron az impulzussal kapcsolatos kérdéseinkre válaszolni. Lehetséges, hogy az elektronnak egyáltalán nincs is olyan tulajdonsága, amelyet mi a hétköznapi fogalmaink alapján impulzusnak nevezünk, viszont vannak egyéb tulajdonságai, amelyek következtében az impulzusra vonatkozó kérdésünkre határozott választ ad. Kísérleti eredményeket - „válaszokat” - kapunk, amelyeket úgy értelmezünk, mintha az impulzust mértük volna meg. Ám ezek a válaszok valójában nem a tényleges impulzust mondják meg, hanem csak azt, hogy az elektron milyen sikerrel képes megfelelni az impulzustesztnek, éppúgy ahogyan az IQ mérésének az eredménye sem a valódi intelligenciáról ad felvilágosítást, hanem csak arról, hogy az illető milyen sikerrel képes megoldani az IQ-teszt feladatait.

Nick Herbert amerikai fizikus egy másik analógiát említ. Bohr kijelentése szerint az izolált anyagi részecskék nem is léteznek, azok csupán absztrakciók, amelyeket csak a más rendszerekkel való kölcsönhatásaik alapján tudunk azonosítani - például amikor „megmérjük” az elektron „impulzusát”. Olyan ez, mondja Herbert, mint egy szívárvány. A szívárvány nem létezik anyagi testként,

és a jelenséget minden megfigyelő másutt látja. Nincs két olyan ember, akik ugyanazt a szivárványt láthatnák (valójában még a két szemünk is hajszálnyival különböző szivárványt „lát”). A szivárvány mégis valóságos, hiszen lefényképezhető. Ugyanígy azt is mondhatjuk, hogy a szivárvány nem valóságosan létező dolog, hacsak valaki meg nem figyeli, vagy le nem fényképezi. Hasonlóképpen, Bohr szerint, egy kvantummechanikai objektum, például elektron tulajdonságai is csak valamiféle illúziók, amelyeket csak az objektumnak a kísérleti elrendezésben létrejövő kölcsönhatásai hoznak létre.

A koppenhágai értelmezés ezen alapváltozata szerint csak a mérés eredményéről készült feljegyzés számít „ténynek” - a Geiger-számláló kattánása, vagy az elektron beérkezését jelző fényfelvillanás a detektor képernyőjén. Ám maguk a mérőeszközök is kvantummechanikai objektumokból állnak, hogyan lehetne mégis elkerülni, hogy azokat is a kísérlet tárgyát képező kvantummechanikai objektumokkal azonos módon írjuk le? Elvben maga a Geiger-cső is egy kvantummechanikai valószínűségi hullámmal írható le, amely két állapot („kattanás” és „nem kattanás”) szuperpozíciójaként írható le, mindaddig, amíg a mérést nem hajtottuk végre. Elképzelhetjük azt is, hogy magát a detektort egy második detektor általi megfigyelés teszi valóságossá, ám ez esetben a második detektor létezik az állapotok szuperpozíciójaként (mint Schrödinger macskája), egészen addig, amíg egy harmadik detektorral meg nem figyeljük, és így tovább a végtelenségig. Ennek a gondolatsornak a folytatásaként jutnak a kvantummechanika egyes értelmezői arra a következtetésre, miszerint az intelligens megfigyelők agyában valamilyen különleges folyamat játszódik le, amelyik kiváltja a hullámfüggvény összeomlását.

Még mindig a koppenhágai értelmezésről van szó, vagy legalábbis egy hosszan életben maradt változatáról. Peierls szerint (aki, mint láttuk, megrögzött „koppenhágai”) „az a pillanat, amikor elvethetjük az egyik lehetőséget és csak a másikat tarthatjuk meg, nem más, mint amikor végre tudatosan bennünk az a tény, hogy a kísérlet egyetlen eredményt adott.”⁵³

Ez az érvelés vezette John Wheelert arra a következtetésre, mely szerint a Világegyetem csak azért létezik, mert megfigyeljük. Ebben az értelmezésben a kvantummechanikai leíráshoz a tudás fogalmait használjuk, ezért a tudat létezése döntő fontosságú. Ez lényegesen különbözik attól az elképzeléstől, mely szerint a fizikai méretnek bármi köze lenne a kvantumvilág és a hétköznapi világ közötti különbségtételhez, jóllehet ez az elgondolás is a koppenhágai értelmezés révén terjedt el a köztudatban. Az elgondolással kapcsolatban az a legjelentősebb probléma, hogy hol húzzuk meg a határvonalat. Roger Penrose (Oxford Egyetem) A császár új elméje című könyvében azzal érvel (számomra nehezen elfogadhatóan), hogy mindehhez a gravitációnak van valami köze. A gravitáció nagyon gyenge kölcsönhatás, és az olyan objektumok esetében, mint például az elektronok, teljességgel figyelmen kívül hagyható. Talán ha ezt a gondolatmenetet követjük, nem szabad arról megfeledkeznünk, hogy ha elegendő anyag van jelen, akkor a gravitáció lerombolja az objektumok „kvantumosságát”,

53 Davies és Brown: The Ghost in the Atom, 73. oldal.

aminek következtében azok közönséges, „klasszikus” objektumokká válnak. Penrose sokkal bonyolultabb érvrendszert fejlesztett ki, amelyben szerephez jut a fekete lyukakban elvesző információ és az, hogy miként tudja ezt kompenzálni a Világegyetemben bárhol másutt végbemenő kvantummechanikai tevékenység; mindamellett a csomag egészében véve egyáltalán nem meggyőző. Valamivel elfogadhatóbb David Bohm érvelése, aki szerint a hő lehet felelős a kvantumvilág peremeinek el-mosódottságáért. E gondolatmenet szerint minden egyes atomot és minden elektront folyamatosan lökdösnek szomszédjai a véletlenszerű termikus mozgás révén, és talán ez rontja el egyes objektumok kvantumosságát, amikor már kellően nagy méretet érnek el, és elegendő számú részecske taszigálja egymást.

Azonban a kvantummechanika értelmezői, akik mindent „csak az elmében létezőnek” tekintenek, semmit nem fogadnak el ebből. Szerintük egy test lehet akár akkora is, mint a Hold, akkor is atomokból áll, amelyeket a gravitáció tart össze, és amelyeket a véletlenszerű hőmozgás a hőmérsékletének megfelelő mértékben ide-oda taszigál, ezért az ilyen testek sem léteznek, amikor éppen senki nem néz rájuk. Dávid Mermin a Cornell Egyetemen egyike az így gondolkozó fizikusoknak. A Hold nem egyszerűen csak eltűnik, amikor éppen senki nem néz rá, mondják az elgondolás hívei, hanem sokkal inkább a harmadik fejezetben leírt kvantumfázék berilliumatomjaihoz hasonlóan viselkedik - tehát a Hold az összes atomjával, elektronjával és egyéb kvantummechanikai összetevőivel együtt bizonytalanává válik azok kvantumállapotát illetően. A valószínűségi hullám elkezd - nagyon lassan - szétterjedni abból az állapotból, amelyben a legutóbbi megfigyeléskor volt, vagyis az egész Hold valamiféle kvantummechanikai kísértetté kezd szétfolyni. Mivel azonban a Hold nagyon nagy, a folyamat roppant lassú. A Hold esetében nem néhány nanoszekundumig, hanem sok millió (sőt talán több milliárd) évig tart, mire az egész Hold feloldódik a kvantummechanikai bizonytalanságban. Ám jóval előbb, mint ahogy ez megtörténhetne, valaki rápillant a Holdra, ezért az visszaomlik szép, jól meghatározott állapotába, ahol pontosan behatárolható tömegközéppontja meghatározott pályán kering a Föld körül. A Hold (és minden más) nyilvánvaló létezése valóságos égitestként ezen értelmezés szerint nagyon egyszerűen, a kvantumfázék megfigyelésénél mondottakkal magyarázható.

John Bell megpróbálta tömören összegezni a helyzetet. Azzal példálódzóit, mi történik, ha egy elektront kilövünk egy szcintillátor ernyő irányában, az ernyőt lefényképezzük, és valaki megnézi a fényképet, mert tudni szeretné, mi lett a kísérlet eredménye.

Létezik egy romantikus alternatívája (annak az elképzelésnek, mely szerint a kvantumvilág és a hétköznapi világ közötti különbségtétel pusztán méret kérdése). Elfogadjuk a „kvantum” és a „klasszikus” közötti határvonal létezését, amely éles vagy elmosódott egyaránt lehet. Ahelyett azonban, hogy ezt a határvonalat a kicsi és a nagy között húznánk meg, ez az elmélet az „anyag” és a „szellem” közé teszi a választóvonalat. Ha megpróbáljuk a lehető legteljesebbé tenni az elektronágyúról alkotott képünket, akkor először figyelembe kell vennünk a szcintillációs ernyőt, azután a fényképezőgépben használt filmet, az előhíváshoz

használt vegyszereket, végül a fényképet szemlélő ember szemét ... majd végül (miért is ne?) még az agyát is. Minthogy az agy is atomokból, azaz elektronokból és atommagokból áll, miért vonakodunk ezekre a hullámmechanika szabályait alkalmazni... legalábbis abban az esetben, ha elég ügyesek vagyunk ahhoz, hogy az atomok felettébb bonyolult rendszerére elvégezzük a szükséges számításokat? Ám az agyon túl ... ott van a tudat. Bizonyosak vagyunk abban, hogy a tudat nem anyag? Nos, egészen bizonyosak lehetünk abban, hogy itt már valami olyasmivel találjuk szembe magunkat, ami alapvetően különbözik az üvegekpernyőtől és a film zselatinrétegétől.⁵⁴

A kvantummechanika értelmezői, akik megpróbálják kifejtetni ezeket az elképzeléseket, úgy gondolják, hogy maga az agy is a kvantummechanikai rendszerek egy speciális fajtája, amelyik holisztikus, nemlineáris módon működik, és kiváltképp a hullámfüggvények összeomlásának előidézésére alkalmas. Természetesen a kvantummechanikai folyamatok a gondolkodást és a tudatot is magukban foglalják, amint arra Henry Stapp a berkeleyi Kalifornia Egyetemen rámutatott. Az emberi idegek, az agyban találhatóakat is beleértve, elektromos impulzusok továbbítása révén működnek. Ezeket az impulzusokat az úgynevezett szinapszisokon keresztül kémiai úton továbbítják (a szinapszisokat az idegek csatlakozásaiként képzelhetjük el). Az idegsejt mentén terjedő impulzus kalciumionok felszabadulását váltja ki, amelyek leküzdik a két idegsejtet elválasztó távolságot, majd a másik sejtben kiváltják a következő elektromos impulzust. A folyamatban részt vevő átlagos kalciumion 200 milliomod másodperc alatt megteszi a mintegy 50 milliárdod méteres távolságot. „A határozatlansági reláció alapján végzett egyszerű becslések arra mutatnak”, mondja Stapp, „hogy a kalciumionok hullámcsomagjának sok nagyságrenddel nagyobbra kell nőnie magának a kalciumionnak a méreténél. Ennélfogva az egyetlen, klasszikus fizikai pálya képe érvényét veszti, ehelyett elvben a kvantummechanika fogalmait kell használni”.⁵⁵

Ez lényegében igaz, sőt mondhatnánk nyilvánvaló, ha már egyszer rámutatunk; azonban minőségileg semmiben sem különbözik Bell észrevételétől, miszerint az agy atomokból áll, ezért a hullámmechanika törvényeinek kell engedelmeskednie. Ez nem azt jelenti például, hogy az emberi agy ezen kvantumtulajdonságaiból arra kellene következtetnünk, hogy a mesterséges, számítógépagy soha nem lehet tudatos, jóllehet akadnak, akik így próbálnak érvelni. Végző soron az elektronikus számítógépek ugyancsak atomokból állnak, és így a kvantummechanika törvényeinek engedelmeskednek; ha például kiderülne, hogy a szinapszisok kvantummechanikai határozatlanság uralta tartományában szétterjedő kalciumionok meghatározott tulajdonságai döntő jelentőségűek például a tudatosság szempontjából, akkor ennek egyenes következményeképpen (elvben

54 Bell: *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, 191. oldal. Szeretném hangsúlyozni, hogy az idézetben Bell nem a saját véleményét fejt ki a kvantummechanikai valóságról, hanem mások, például Wigner Jenő és John Wheeler véleményét összegezi.

55 Stapp: *Mind, Matter, and Quantum Mechanics*, 152. oldal.

legalábbis) olyan mesterséges számítógépagyat lehetne konstruálni, amelynek működése ugyanezen a tulajdonságon alapul.

De ami sok, az sok. Bár egyesek még messzebbre merészkedtek ezen a titokzatos úton, erre nincs szükség. Megmutattam Önöknek, hová vezet a koppenhágai értelmezés, ha engedjük; és (remélem legalábbis) sikerült Önöket meggyőzőnöm arról, hogy ez nem a kvantummechanikai valóság kielégítő magyarázata. Mint mondtam, sikere nagyrészt annak a történelmi véletlennek volt köszönhető, hogy ez volt az első, részleteiben is kidolgozott értelmezés, amelynek ráadásul egy tekintélyes személyiség volt a szószólója. Murray Gell-Mann Nobel-díjas fizikus erről már 1976-ban így vélekedett: „Niels Bohr agymosásban részesítette a fizikusok egész generációját, amikor elhitette velük, hogy a probléma már meg van oldva”.⁵⁶ Mindamellett, a Bohr-féle agymosás sikerének egyik oka az volt, hogy úgy tűnt, az egyetlen rivális értelmezés lába alól kihúzta a talajt a matematikus Neumann János által elvégzett egyik számítás. Az igazsághoz azonban hozzátartozik, hogy Neumann tévedett.

Neumann János hibája

Neumann János tévedése különösen szerencsétlen hiba volt, mert a kvantummechanikának az az értelmezése, amelyet Neumann eredménye kizárni látszott, tulajdonképpen sokkal közelebb áll a valóságról alkotott naiv elképzelésünkhöz, mint a koppenhágai értelmezés. A fizikusok (mint általában a legtöbb természettudós) figyelemreméltóan konzervatívak, és amíg csak lehetséges, ragaszkodnak a régi nézetekhez, mindaddig, amíg a megcáfolhatatlan kísérleti bizonyítékok visszavonulásra nem késztetik őket. Elfogadva ezt a szokásos viselkedést, nagyon valószínűnek tűnik, hogy a koppenhágai értelmezéssel megvívott nyílt csatában a másik értelmezés, amelyet ma „rejtett változók” elméleteként ismerünk, könnyűszerrel diadalmaskodott volna. A fizikusok generációi azt tanulták volna az iskolában, hogy a rejtett változók elmélete a kvantummechanikai valóság magyarázatának alapvető módja, és a koppenhágai értelmezésre csak mint egy Niels Bohr által felvetett, történeti érdekességű alternatívára emlékeztek volna, amelyet akkor alkotott, amikor szenilis ugyan még nem volt, de mindenesetre alkotóereje csúcspontján már jóval túljárt.

A rejtett változók elméletének lényege az, hogy egy kvantummechanikai objektum, például egy elektron a szó hétköznapi értelmében valóságos részecskeként létezhet, tehát minden pillanatban valóságos lehet a helye és az impulzusa, azonban e két tulajdonságát nem tudjuk egyidejűleg, korlátlanul pontosan megmérni. E kép szerint a részecske viselkedését a kvantumvilágban valamilyen további jelenség határozza meg - ezt általában valamilyen még ismeretlen térrel szokták azonosítani -, amely olyan módon változik, hogy ne lehessen közvetlenül megfigyelni. Az új tér rejtett változói kvantummechanikai

56 Gell-Mann: The Nature of the Physical Universe (New York, Wiley), 29. oldal.

szinten meghatározzák a részecske viselkedését, és ha a fizikusok tudnák, melyek ezek a rejtett változók, akkor a segítségükkel pontosan előre tudnák jelezni kísérleteik eredményét, nem csak a különféle eredmények bekövetkezésének a valószínűségét. Ebben az esetben például ki tudnák számítani, hogy Schrödinger macskája még él, vagy már elpusztult, anélkül, hogy ehhez a dobozt ki kellene nyitniuk.

A rejtett változók standard elméletét Louis de Broglie 1925-ben tette közzé. De Broglie 1892-ben született (és 1987-ig élt), tudományos pályafutását azonban csak későn kezdte, részben azért, mert tanulmányait az első világháború miatt félbe kellett szakítania. Ő ismerte fel elsőként, hogy az elektron hullámként is leírható, és az 1920-as évek közepén megpróbálta ezt a felfedezését összeegyeztetni a ténnyel, hogy az elektron részecskeként is leírható. Nagyon közel jutott a kvantummechanika értelmezésének egy nagyon gyümölcsöző módjához. Ám sajnos de Broglie - bár a francia arisztokrácia tagjai sorába tartozott (- bátyja 1960-ban bekövetkezett halálával nem csak a francia Duc, hanem a német Prinz címet is örökölte) - nem volt olyan erélyes egyéniség, mint Bohr, ezért nem harcolt elég szívósan a saját igazáért, amikor nézeteit az 1930-as években kétségbe vonták. Elképzelésének lényege, hogy például egy elektron a szó mindennapi értelmében „valóságos” részecske, ám viselkedését az határozza meg, hogy miként „uralkodik rajta” az úgynevezett vezérhullám, amely viszont a kvantummechanika valószínűségi szabályainak engedelmeskedik.

De Broglie ötlete soha nem volt túlságosan népszerű a koppenhágai értelmezés hívei körében, ám látszólag még a kegyelemdöfést is megkapta, amikor Neumann János 1932-ben megjelentette nagy hatású, eredeti gondolatokban gazdag könyvét a kvantummechanikáról. Egyebek között ebben a könyvben megjelent egy matematikai bizonyítás, amely látszólag arra vonatkozott, hogy a rejtett változók elmélete soha nem lehet képes helyesen leírni a kvantumvilág objektumainak viselkedését.

A fizikusok ezt szó szerint elfogadták, hiszen Neumann kora legnagyobb matematikusai közé tartozott. Neumann 1903-ban Budapesten született (eredeti keresztnéve János volt, de később mint John von Neumann használta a nevét). 1928-ban felfedezte a matematika egy új, ma játékelméletként ismert ágát, amely matematikai modellek (egyenletrendszerek) felállításával foglalkozik. E modellek segítségével lehet meghatározni valamely játék során követendő optimális stratégiát - vagyis azt, miként tehetünk szert a legnagyobb nyereségre, és hogyan kerülhetjük el a veszteségeket. A játékelmélet a matematika jelentős ágává fejlődött, hiszen a háborús „játékokra” és a közgazdasági modellezésben egyaránt eredményesen lehet alkalmazni. Neumann vetette fel azt is elsőként, hogy a hullámfüggvény összeomlásának kiváltásához és az állapotok szuperpozíciójából az egyik alternatíva kiválasztásához tudatos megfigyelőre van szükség.

Neumann 1930-ban kivándorolt az Egyesült Államokba, ahol 1933-ban a nem sokkal korábban (részben Einstein számára) alapított princetoni Institute of Advanced Studies legfiatalabb munkatársa lett. Bekapcsolódott az elektronikus

számítógépek úttörő fejlesztésébe (Magyarországon Neumannt az első számítógép megalkotójaként tisztelik - a szerkesztő megjegyzése), valamint az atom- és hidrogénbomba elkészítését célzó kutatásokba. Bár 1957-ben fiatalon elhunyt, mégis jelentős hatást gyakorolt a természettudományok XX. századi fejlődésére.

Neumannból nem lehetett egykönnyen bolondot csinálni, ám néha a zsenik is bakizhatnak.

Ez a baklövés a szó szoros értelmében az összeadással állt kapcsolatban. A matematikában, amikor nem számít, hogy egy bizonyos műveletet milyen sorrendben végzünk el, akkor a szóban forgó egyenletet kommutatívnak (azaz felelserélhetőnek) mondjuk. Például $3 + 2$ ugyanannyi, mint $2 + 3$. Az összeadás tehát kommutatív művelet. Ha viszont nem közömbös a művelet elvégzésének sorrendje, akkor az adott tulajdonság nem kommutatív. Például $3-2$ nem azonos $2-3$ eredményével. A kivonás tehát nem kommutatív művelet. A kvantumvilágban előfordulhat, hogy még az összeadás sem mindig kommutatív. Általában a dolgok előfordulásának a sorrendje hatással van a kölcsönhatások sorozatában kialakuló eredményre. Olyan ez, mint a főzés - ha süteményt sütünk, egészen más eredményt kapunk, ha az „adj hozzá két deci vizet, majd süsd 30 percig” utasítássorozatot fordított sorrendben hajtjuk végre, és előbb sütjük 30 percig, majd csak utána adjuk hozzá a vizet.

Nem akarok belemenni a részletekbe, de Neumann a rejtett változók elmélete működésképtelenségének „bizonyításában” azt a tényt használta ki, hogy egy kvantummechanikai rendszer bizonyos tulajdonsága átlagosan a kommutatív szabálynak engedelmeskedik, ám ő ezt a szabályt a rendszer egyes elemeire alkalmazta. Olyan ez, mintha abból, hogy egy iskolai osztály tanulóinak átlagos testmagassága 1,2 méter, arra következtetnénk, hogy minden egyes diák pontosan 1,2 méter magas. Természetesen ez az egyik lehetőség, amikor az adott átlagértéket kapjuk, de korántsem az egyetlen lehetőség (és még csak nem is a legvalószínűbb lehetőség). Ostobaság lenne feltételezni, hogy minden gyerek pontosan ugyanolyan magas.

Az átlagok képzésénél persze kissé jobban el kell mélyednünk a matematikában, ha fel akarjuk fedezni a buktatót Neumann érvelésében, ám gyakorlott matematikus számára ennek nyilvánvalónak kellene lennie. Az egyik ilyen matematikus, Grete Hermann 1935-ben rámutatott a tévedésre, ám érvelésére senki sem figyelt oda. Mindenki más egészen 1966-ig hitt a Neumann-féle bizonyításban, akkor azonban John Bell rámutatott, hogy a bizonyítás hibás feltevésen alapul. Két évtizeddel később Bell így számolt be arról, mennyire meglepődött a felfedezésén:

Ha jól megmarkoljuk a Neumann-féle bizonyítást, akkor szétesik a kezünkben! Nincs benne semmi. ... Ha lefordítjuk (a feltevéseit) a fizikai fogalmakra, akkor kiderül, hogy képtelenségek. Rám hivatkozva mindenkinek elmondhatják:

Neumann bizonyítása nemhogy rossz, hanem kifejezetten örültség!⁵⁷

David Mermin 1993-ban a végzős egyetemisták azon generációjáról írt akik készletet éreztek rejtett változós elméletek felállítására, de mindannyiszor azzal hurrogták le őket, hogy kár próbálkozni, hiszen Neumann János bebizonyította, hogy ez lehetetlenség. Kijelentette, hogy a Neumann-féle bizonyítás, amely szerint nem léteznek a rejtett változók, egy olyan lehetetlen feltevésen alapult, „hogy az ember csodálkozik, vajon ellenőrizték-e valaha ezt a bizonyítást az egyetemisták, vagy azok, akik el akarták téríteni őket elhatározásuktól, hogy belevágjanak ebbe a szellemi kalandba” a kvantummechanika értelmezésének világában.⁵⁸

Két okból tértem ki erre a kérdésre kicsit részletesebben. Először is azért, mert az eseten keresztül jól látszik, hogy a fizikusok éppoly hiszékenyek, mint bárki más, ha el akarnak fogadtatni velük egy véleményt, amelyről „mindenki tudja”, hogy igaz, meg egyébként is, minden kézikönyvben benne van. Ilyenkor nem törődnek azzal, hogy maguk ellenőrizték a tényeket. Másrészt azért, mert a Neumann-féle „bizonyítás” mindenütt elterjedt, a kvantummechanikáról szóló népszerű és félig tudományos írásoktól kezdve egyes kézikönyvekig. Utóbbiak közül egyesek még mindig azt tartják, hogy a rejtett változókkal dolgozó elméletek lehetetlenek, jóllehet Bell már 1966-ban kimutatta a tévedést. Ne higgyünk nekik! A rejtett változós elméletek (vagy értelmezések) igenis működőképesek lehetnek, ennek csupán egyetlen fontos feltétele van, melyre később térek ki. A meglepő az egészben az, hogy végül mégiscsak akadt legalább egyetlenegy valaki, aki az 1950-es években nem rettent vissza attól, hogy megpróbáljon megalkotni egy ilyen elméletet, és akit még azzal sem lehetett térdre kényszeríteni, hogy (átvitt értelemben legalábbis) fejbe verték őt a Neumann-féle „bizonyítással”. Ez az ember Dávid Bohm, aki évek alatt, némi segítséggel, kifejlesztette a kvantummechanika rejtett változós értelmezését. Ez pontosan ugyanolyan jól működik, mint a koppenhágai értelmezés, ám a kvantummechanikai valóság attól gyökeresen eltérő képét tárja a szemünk elé.

Az osztatlan egész

Bohm a valóság természetéről alkotott, saját, Peierls nézeteivel szöges ellentétben álló felfogását *The Ghost in the Atom* című könyvében foglalta össze. Amikor arról kérdezték, hogy véleménye szerint a külső világ az általunk végzett megfigyelésektől függetlenül is létezik-e, így felelt: „Minden fizikus valójában abban hisz, hogy a Világegyetem, mint egész nem függ tőlünk ... a magam

57 Interjú az *Omni* című lapban, 1988. május, 88. oldal.

58 *Reviews of Modern Physics*, 65 (1993), 803. oldal.

Az interjúrészletet olvasva felmerülhet, talán Bell elfogult volt Neumannal szemben. A történet ugyanis nem arról szól, hogy a köztudottan kiválóan számoló zseni számtani hibát vétett, hanem hogy az elméleti matematikát nem megfelelően alkalmazták a fizikában (a szerkesztő megjegyzése).

részéről nem hinném, hogy (az elme) különösebb hatást gyakorolna az atomokra.”⁵⁹

Valószínűleg fontos körülmény, hogy Bohm már nem a kvantummechanika úttörői közé tartozott, hanem egy későbbi generációt képviselt. Minthogy 1917-ben született, a kvantummechanika alternatív értelmezésének szisztematikus felépítéséhez csak az 1950-es évek elején fogott hozzá, vagyis 20 évvel azt követően, hogy a koppenhágai értelmezés elfoglalta uralkodó helyét a fizika színpadának kellős közepén. Fontos tényező lehet talán az is, hogy Bohm Amerikában született, ezért a szó szoros értelmében egy óceán választotta el Niels Bohr erős befolyásától.

Ugyanakkor arra is rájöttem, mi lehet Bohm gyenge pontja. Megtudtam ugyanis, hogy a tudomány iránt nyolcéves korában a tudományos-fantasztikus könyvek keltették fel az érdeklődését, csak később kezdett csillagászati könyveket is olvasni - szinte pontosan ugyanúgy amint az velem is történt, ugyanennyi idős koromban, 30 évvel később. A második világháború alatt Bohm végzős egyetemistaként Robert Oppenheimer mellett dolgozott Kaliforniában, sőt kismértékben a Manhattan-terv sikeréhez is hozzájárult. Ezt követően a Princeton Egyetemen folytatta karrierjét, ahol könyvet írt, amelyben megpróbálta annak alapján elmagyarázni a kvantummechanikát, amit Niels Bohr nézeteiből megértett. A standard értelmezés magyarázatára tett erőfeszítéseinek köszönhetően ismerte fel, hogy nem érti, hová akar Bohr kilyukadni. Ez indította el őt a saját értelmezés kidolgozása útján.

Nagyjából ugyanabban az időben, amikor hozzákezdett eretnek nézetei kidolgozásához, magánélete zűrzavarossá vált. A Képviselőház amerikaellenes tevékenységet vizsgáló bizottsága elé idézték, és egyes tudóstársai politikai nézeteiről faggatták, akikkel Berkeleyben együtt dolgozott a Manhattan-terven. Mindez a hidegháború kezdetén történt, az 1940-es évek végén, amikor az Egyesült Államok kormánya betegesen rettegni kezdett annak a lehetőségétől, hogy esetleg kommunista ügynökök szivároghatnak be az országba, akik ellophatják az atomtitkot, és átadhatják a Szovjetuniónak. Bohm az ötödik törvénymódosítás alapján, elvi okokból megtagadta a választ a bizottság mindazon kérdéseire, amelyek kollégái magánéletére vonatkoztak, ez a jogszabály ugyanis mindazon esetekben feljogosít a vallomás megtagadására, ha a vallomás gyanúba keverné a tanút.

Abban az időben ez a történet nem keltett különösebb feltűnést, majd hamarosan feledésbe is merült. A kommunista boszorkányüldözés azonban nagy léptekkel haladt előre. Két évvel később Bohmot azzal vádolták meg, hogy nem engedelmeskedett a Kongresszusnak, ezért bíróság elé idézték. Bár a vádak alól felmentették, mégis meghurcolták a nevét, ami a McCarthy-korszak elején elég volt ahhoz, hogy az Egyesült Államokban sehol ne találjon magának állást. Európába ment, és a londoni girkbeck College-ban kezdett dolgozni, ahol az elkövetkező négy évtized alatt kidolgozta a kvantummechanika saját

59 Davies és Brown: The Ghost in the Atom, 119-120. oldal.

értelmezését.

Amint az amerikaellenes tevékenységet vizsgáló bizottsággal szembeni határozott kiállása igazolja, Bohm nem az a fajta ember volt, aki bizalmas kapcsolatot ápol a hatóságokkal vagy engedelmesen beáll a sorba (hiszen közvetve éppen az ellenkezőjével vádolták meg). Neumann János ugyan időközben azt állította, hogy lehetetlen megalkotni a rejtett változók elméletét, ez azonban nem akadályozta meg Bohmot munkája folytatásában. Bár nem találta meg Neumann érvelésében a már említett hibát, azonban megalkotott egy működőképes, rejtett változókkal dolgozó elméletet, miáltal bebizonyította, hogy mégiscsak léteznie kell legalább egy ilyennek. Eszerint tehát vagy Neumann állításának, vagy Bohm elméletének hibásnak kellett lennie. Bohm 1992-ben meghalt, éppen akkor, amikor a koppenhágai értelmezés alternatíváit fizikusok egy maroknyi, szűk csoportján kívül is elkezdtek valóban komolyan venni. Azt azonban még nagy meglepéssel megérhette, amikor Bell megállapította, melyik a hibás a kettő közül (természetesen az, hogy Bell rábukkant a Neumann-féle érvelésben rejtőző hibára, önmagában még nem jelent bizonyítékot Bohm elméletének helyessége mellett, azonban kétségtelenül eltávolított egy komoly akadályt az elmélet sikere útjából).

A kvantummechanikai bizonytalanság Bohm-féle értelmezése szerint a részecskének mindig meghatározott helye és sebessége van, ám ezen tulajdonságok megmérésére irányuló bármely próbálkozásunk következtében megváltozik a részecskékkel összefüggő vezérhullám, ami elrontja a két fizikai mennyiségre vonatkozó információt. Ha valahol nyakon akarjuk csípni a vezérhullámot (például azáltal, hogy megérjük az elektron helyét), akkor ennek következtében azonnal mindenütt megváltozik a vezérhullám alakja, ami minden, a befolyása alatt álló részecskére hatással lesz.

Ez a gondolatmenet két alapvető elképzelésen nyugszik. Egyrészt, mivel a vezérhullám alakja határozza meg, milyen hatással van a hullám a részecskékre, teljesen közömbös, hogy egy adott helyen milyen erős (vagy milyen gyenge) a hullám. Amíg a hullám jelen van, addig az alakjának a megváltozása hatást gyakorol a részecskékre. Másrészt a vezérhullám mindenütt pillanatszerűen reagál az egy adott helyen bekövetkező zavarra. Maga a hullám tehát helyhez nem kötött (vagyis távolhatás lép fel).

Ez az egyetlen kikötés, amire korábban már hivatkoztam. Bell 1966-ban bebizonyította, hogy a rejtett változókkal dolgozó elméletek működőképesek, ha elfogadjuk a távolhatás lehetőségét. Az Aspect-kísérlet szép példa a távolhatás működésére - az egyik foton polarizációs állapotának megmérése azonnal meghatározza a másik foton polarizációs állapotát, még akkor is, ha ez a másik foton éppen a Világegyetem átelles részén tartózkodik.

Önök azonban a szememre vethetik, hogy az Aspect-kísérletet a koppenhágai értelmezés fogalmaival írtam le. Nos, valóban így tettem. Ha Bell azt állapította volna meg, hogy csak a rejtett változós elméletek követelik meg a távolhatás elfogadását, akkor ez komoly érv lenne amellett, hogy az efféle

kvantummechanikai értelmezéseket el kell vetnünk. Bell azonban nem ezt állapította meg, hanem azt, hogy a kvantumvalóság bármely értelmezésének tartalmaznia kell a távolhatás lehetőségét.

Szigorú értelemben ez csupán enyhe egyszerűsítés. Bell megállapította, hogy ha híres egyenlőtlensége megsérülne, akkor abból az következne, hogy el kell vetnünk a „helyi valóság” fogalmát. Ebben az értelemben a „helyi” azt jelenti, hogy nem létezik fénynél gyorsabb kommunikáció, a „valóság” pedig azt, hogy a világ az általunk rajta végzett megfigyelésektől függetlenül létezik. Az Aspect-kísérlettel (es azóta elvégzett más kísérletekkel) sikerült kimutatni, hogy a természetben sérül a Bell-egyenlőtlenség, bebizonyosodott tehát, hogy a „helyi” és a „valóság” közül az egyiket ki kell dobunk. Ez azonban sokkal drámaibb erejű következtetés, mint ahogy első pillanatban érzékelnénk, minthogy a Bell-egyenlőtlenség valójában egyáltalán nem függ a kvantummechanikától. Ha a Bell-egyenlőtlenség sérül (márpedig sérül), akkor a helyi valóság még abban az esetben is elvetendő, ha mondjuk a kvantummechanika teljességgel hibás elmélet lenne. Az Aspect-kísérlet eredménye azt mutatja, hogy a Világegyetem nem „helyi és valóságos”, bármiféle tudományos magyarázatot ötlünk is ki működésének leírására. Ha el akarjuk hinni, hogy létezik „odakint” egy valóságos világ, akkor ezt nem tehetjük meg a távolhatás nélkül. Ha kitartunk amellett, hogy a kommunikáció egyetlen formája sem mehet végbe a fényénél nagyobb sebességgel, akkor nem kaphatunk valóságos, a megfigyelőtől független világot.

Bell, aki 1928-ban született és 1990-ben halt meg, időben még Bohmnál is távolabb élt a kvantummechanika nagy úttörőitől, és soha nem tudta megérteni, az emberek hogyan lehetnek készek szentírásként elfogadni a koppenhágai értelmezést. A Broglie-Bohm-féle elképzelés, miszerint a részecske- és a hullámjelleg egyidejűleg megmutatkozhat, „olyan természetesnek és egyszerűnek tűnt a számomra, mert a segítségével világos és hétköznapi módon feloldható a hullám-részecske dilemma. Csak az tűnt rejtélyesnek, miért nem fogadják el széles körben”, tartotta Bell.⁶⁰ Egyáltalán nem zavarta őt a fénynél gyorsabban terjedő hatások fogalma, még akkor sem, ha ez a visszafelé haladást jelentette (mint ahogy valóban azt jelentette). Azt állította, hogy inkább feladná Einstein speciális relativitáselméletét, ha vissza kellene térni az éter fogalmához (vagy legalább a kitüntetett vonatkoztatási rendszer létezéséhez), mintsem hogy elvesse a valóság fogalmát:

Képesek akarunk lenni valóságos képet alkotni a világról, úgy akarunk beszélni a világról, mintha valóban ott lenne, akkor is, amikor éppen senki sem figyeli meg. Természetesen hiszek egy olyan világban, amelyik már az én megjelenésem előtt is itt volt, és itt lesz akkor is, amikor én már nem leszek itt, és azt hiszem, hogy ennek a világnak Ön is része! Hiszem továbbá, hogy a legtöbb fizikus elfogadja ezt az álláspontot, mihelyt sarokba szorítja őt egy filozófus.⁶¹

60 Bell: *Speakable and Unspeakable*, 191. oldal. Davies és Brown: *The Ghost in the Atom*, 50. oldal.

61 Továbbfejlesztette azt az elképzelést, miszerint minden kapcsolatban áll minden mással, és a vezérhullám által (pillanatszerűen) hatással van rá mindaz,

Mindezek az elképzelések, különösen pedig a Világegyetem minden egyes pontjában uralkodó feltételekkel tisztában lévő, és a részecskéket ennek megfelelően irányító vezérhullám fogalma feltűnő hasonlóságokat mutat a kvantummechanika Richard Feynman történetek összegzésével operáló megközelítésmódjával. Nem azt mondjuk, hogy „a foton” minden egyes, lehetséges útvonalat bejár a fényforrástól a tükörig és onnan a szemünkig, hogy abban létrehozza a tükörképet, hanem kijelentjük, hogy „a vezérhullám” jár be minden lehetséges útvonalat, majd „közli” a fotonnal, melyik útvonalat kell bejárnia. A Bohmnál csupán egy évvel fiatalabb Feynman természetesen térben és időben egyaránt távol volt a koppenhágai értelmezés híveitől, és újszerű elképzeléseivel évtizedekkel a koppenhágai értelmezés megalkotását követően állt elő. Hogy, hogy nem, egészen a közelmúltig Feynman elképzeléseit elfogadhatóbbnak tartották, mint Bohm nézeteit (az elfogadhatóbb megjelölés persze viszonylagos, hiszen Feynman nézetei csak Bohméhez képest voltak elismertebbek, önmagukban távol álltak a teljes elfogadottságtól; ma még a kvantummechanikai problémák megoldásakor a történetek összegezésének módszerét is sok fizikus túl merésznek tartja, annak ellenére, hogy a módszer működik). Mindkét elgondolás azonban fogalmilag a kvantumvalóság természete értelmezésének egy másik, felettébb furcsa módjával áll kapcsolatban, mely nemcsak a távolhatást vagy a minden lehetséges útvonalat bejáró fotonokat foglalja magában, hanem a világegyetemek végtelen sokaságának rendszerét. Ezekben minden egyes kvantummechanikai szintű választási lehetőség minden lehetséges kimenetele megvalósul, méghozzá (bár ezt az értelmezés szószólói nem mindig ismerik el) határozottan nemlokális módon.

A világegyetemek sokasodása

Nyilvánvaló okok miatt (amelyek rövidesen nyilvánvalóak lesznek, akkor is, ha most még nem azok) mindezt a kvantummechanika sokvilág-értelmezésének nevezzük. A magam részéről hosszú időn keresztül ez volt a kedvenc

ami bárhol a világon történik. Szerinte az egymástól látszólag függetlenül létező dolgok élik a maguk életét, anélkül, hogy látszana közöttük bármiféle kapcsolat, ám valójában mindegyikük valamilyen, a jelenségek mélyén működő folyamat megnyilvánulása. Nagyon leegyszerűsített analógia lehet a táncosnak a színpad egymással szemközti oldalaira vetülő árnyéka. A táncos mozog a színpadon, aminek következtében mindkét árnykép változik. Ha csak az árnyékokat látnánk, úgy tűnne, mintha valamilyen titokzatos módon kölcsönhatásban állnának egymással, amiben természetesen a távolhatás is szerephez jut. Valójában a két árnykép mindegyikének változása egy, az események mélyebb szintjén lejátszódó történést tükröz. Ötlete kidolgozásának későbbi szakaszában Bohm felvetette, hogy a világot megalapozó rendet egy végtelenül sok, egymást átfedő hullámból álló mező jelenti, miközben a hullámok átfedése helyi jelenségeket hoz létre, amelyeket részecskékként érzékelünk.

elképzelésem, részben azért, mert soha nem szimpatizáltam a koppenhágai értelmezéssel, és ez tűnt a legjobb alternatívának, másrészt pedig azért, mert csodálatos alapot teremt tudományos-fantasztikus történetek megírásához. A sokvilág-értelmezés története azonban ennél sokkal bonyolultabb, ugyanakkor az értelmezés nagyon népszerűvé vált, aminek eredményeképpen amőbaszerűen három különböző sokvilág-elméletté osztódott. Ezzel egy időben azonban felbukkant egy még jobb értelmezés, amelyet könyvem Epilógusában fogok bemutatni. Ez mindazokat elbűvölte, akik elégedetlenek voltak az elmúlt 40 év alatt eléjük tárt kínálattal. Ma már nem vagyok annyira lelkes a sokvilág-értelmezést illetően, mint korábban, bár az meg ma is legalább olyan jónak látszik, mint a koppenhágai értelmezés; és továbbra is megtermékenyítően hat a tudományos-fantasztikus írók fantáziájára. Az alábbiakban bemutatom tehát az elméletet a maga teljes dicsőségében.

A sokvilág-elmélet alapgondolata szerint mindannyiszor, amikor a világegyetem egy kvantummechanikai szintű döntési helyzetbe kerül, az egész Világegyetem megsokszorozódik, és pedig annyi példányban, ahány lehetséges kimenetele van a szóban forgó eseménynek. Legegyszerűbben Schrödinger tiszteletreméltó „macska a dobozban” kísérletével szemléltethetjük a helyzetet. Ebben a kvantummechanikai gondolkísérletben mindössze két választási lehetőség adódik. A radioaktív atom vagy elbomlik, és akkor a macska elpusztul, vagy nem bomlik el és akkor az állat életben marad. Emlékezzünk vissza, hogy a hagyományos koppenhágai értelmezés szerint egyik lehetőség sem valóságos mindaddig, amíg egy intelligens megfigyelő bele nem kukkant a dobozba. Amíg ez nem történik meg, a doboz belsejében minden az állapotok szuperpozíciójaként létezik, vagyis a megfigyelés elvégzéséig a macska valamiképpen sem nem él, sem nem pusztult el. A sokvilág-értelmezés szerint viszont mindkét állapot valóságossá válik, méghozzá abban a pillanatban, amikor a rendszer szemben találja magát a választás lehetőségével. Ám ennek az az ára, hogy a Világegyetem kettéosztódik. A Világegyetem egyik másolatában a kísérletező a dobozt kinyitva abban egy élő macskát talál, míg a valóság másik változatában a dobozt kinyitó kísérletező egy elpusztult macskát lát. A döntő tényező azonban az, hogy ebben az esetben nem volt szükség a macska sem élő sem holt állapotára a doboz kinyitása előtt, mint ahogy nem kellett feltételezni az állapotok rejtélyes szuperpozícióját vagy a hullámfüggvény összeomlását a megfigyelés pillanatában. Minden egyes megfigyelő az gondolja, hogy ő figyeli meg az egyetlen létező Világegyetemet, miközben a két különböző Világegyetemben élő embereknek semmilyen lehetőségük sincs arra, hogy egymással kommunikáljanak.

A sokvilág-értelmezést Hugh Everett 1957-ben dolgozta ki, amikor egyetemistaként John Wheeler irányításával dolgozott. Abban az időben Wheeler támogatta az elképzelést, ám ma már úgy tűnik, hogy az elgondolással kapcsolatos mérsékelt lelkesedésében (szemben például a Wheeler-Feynman-féle elnyelési elmélet melletti lelkesebb kiállásával) az a tény is közrejátszhatott, hogy a sokvilág-értelmezést néha „Everett-Wheeler-elméletnek” szokták nevezni, de soha senki nem használja a „Wheeler-Everett-elmélet” megjelölést. Néhány évvel később Wheeler megváltoztatta a sokvilág-értelmezésről alkotott véleményét, mert úgy gondolta, hogy bár az elmélet minden elképzelhető kísérletben pontosan

ugyanazokat az eredményeket jelzi előre, mint a koppenhágai értelmezés, ám túlságosan sok „metafizikai terhet” kell magával cipelnie ahhoz, hogy elfogadható legyen. Ez az ellenvélemény ízlés dolga; az állapotok szuperpozíciójának és az összeomló hullámfüggvénynek az egész ügye magával hurcolja saját metafizikai terhét, és egyesek szerint (engem is beleértve) ezt a terhet még nehezebb megemészteni, mint a sokvilág-elképzelést. Wheelernek azonban van még egy érve.

A problémát az jelenti, hogy a sokvilág-értelmezés eredeti formájában megköveteli a világegyetemek végtelen sokaságának a létezését, amelyek mindegyike minden másodperc minden pillanatában a valóság végtelenül sokféle változatává osztódik, amint a Világegyetem(ek)et alkotó atomok és elemi részecskék folytonosan szembekerülnek a kvantummechanikai választás szükségességével, hogy ezután a jövő felé haladva minden lehetséges útvonalat egyidejűleg kövessenek. Emberi fogalmaink szerint úgy gondolhatunk ezekre az alternatív világokra, hogy létezik egy olyan világ, amelyikben a déliek győztek az amerikai polgárháborúban, egy másik, amelyikben a kommunistáknak nem sikerült megszerezniük a hatalmat Oroszországban, és így tovább. Amint említettem, mindez ragyogó terep a sci-fi írók számára, ugyanakkor ezen az emberi szinten meglehetősen ésszerűnek is látszik. Mindenki szívesen játszik el a gondolattal, hogy „mi lenne ha” a történelem néhány kulcsfontosságú eseménye másként alakult volna. De vajon az is ugyanilyen ésszerű, ha minden aprócska kvantummechanikai választási lehetőség esetén megengedjük a világok sokszorozódását? Márpedig ha ezt nem tartjuk ésszerűnek, a történelem sorsfordító eseményeinél viszont el tudjuk fogadni a világ megsokszorozódását, akkor újra visszajutunk ahhoz a problémához, hogy hol kell meghúznunk a határvonalat a kvantumvilág és a hétköznapi világ között. Ugyanakkor elgondolkozhatunk azon is, hogy egy adott kvantummechanikai választás következményei elegendően nagyok-e ahhoz, hogy egy intelligens megfigyelő már akkor érzékelje, amikor annak még semmilyen hatása nem mutatkozik meg.

Deutsch szerint a kétréses kísérletben, amikor a fotonnak választania kell, hogy melyik résen menjen át, akkor valójában az egész Világegyetem kettéhasad, és a valóság egyik változatában a foton az egyik útvonalat követi, míg a másik változatában a másik utat járja be. Ezután azonban a két útvonal, amelyeket a foton bejárhatott volna, találkozik, ennek megfelelően a fotonok interferálnak egymással, vagyis létrejön az interferenciakép. Deutsch szerint ekkor - és ez egyértelmű előrelépés Everett eredeti elgondolásához képest - a valóság két változatát egyesítjük egymással, vagyis azok csak addig léteztek egymással párhuzamosan, két, önálló valóságként, amíg a foton keresztülhaladt a kísérleti berendezésen. Az a tény, hogy még abban az esetben is megfigyeljük az interferenciát, amikor a fotonokat csak egyenként engedjük át a két rést tartalmazó berendezésen, Deutsch szerint ékes bizonyítéka annak, hogy az egyetemes téma minden lehetséges kvantummechanikai szintű variációja bizonyos értelemben valóban „egymás mellett” létezik. Ebben a megfogalmazásban a sokvilág-értelmezés a Feynman-féle, a történetek összegzésén alapuló megközelítés egy változatának tűnik. De vajon mennyire „valóságosak” a párhuzamos történelmek?

Deutsch kigondolt egy olyan kísérletet, amelyik - állítása szerint - alkalmas annak eldöntésére, hogy valóban léteznek-e más világegyetemek. Egyelőre még nem lehetséges elvégezni a kísérletet, ám néhány évtizeden belül lehetővé válhat - természetesen mindenképpen az emberi életnél rövidebb időn belül -, ha a számítástechnika a jelenlegi ütemben fejlődik.

Javaaslata szerint olyan számítógépi „agyat” kell építeni, amelyik közvetlenül tisztában van a kvantummechanikai szinten lejátszódó eseményekkel. E szuperagy számára ki kell jelölni azt a feladatot, hogy figyeljen meg egy olyan kvantummechanikai rendszert, amelyikben valamely mérésnek csakis két, pontosan azonos valószínűséggel bekövetkező eredménye lehet - ilyen lehet például egy foton polarizációjának a megmérése, ha a kísérleti berendezésünk csak két lehetséges irányt enged meg a polarizációra. Ha a sokvilág-elmélet Deutsch-féle változata helytálló, akkor maga a szuperagy is önmaga két másolatává hasad, és a két másolat egyike a mérés egyik lehetséges kimenetelét fogja észlelni, míg a másik a másikat. A számítógép azonban a mérés pontos eredményének feljegyzése helyett egyszerűen csak azt jegyzi meg, hogy a kísérlet két lehetséges eredménye közül az egyiket, és csak az egyiket figyelte meg.

A mesterséges agy mindkét párhuzamos valóságban pontosan ugyanilyen feljegyzést készít, megbizonyosodva arról, hogy valóban csak egyetlen valóságot figyel meg. Ezután a két valóságot valamilyen interferencia-folyamat keretében egyesítjük egymással (talán úgy, hogy ismét összekeverjük a foton polarizációs állapotát). „Ha a hagyományos értelmezés helyes”, véli Deutsch, „akkor a (szuperagy által végrehajtott) műveletek során valamikor, egy kivételével az összes világegyetem eltűnik”, amint a kvantummechanikai mérés következtében összeomlik a hullámfüggvényük, így végül nem kapunk interferenciát. Ezzel szemben, ha a sokvilág-értelmezés a helyes, akkor továbbra is megmarad az interferencia, annak ellenére, hogy az agy csak az egyik átmeneti valóság megfigyelésére emlékszik vissza. Az agy azonban nem képes a két átmeneti valóság bármelyikére ilyen formán visszaemlékezni; egyszerűen csak arra emlékszik, hogy csak egyetlen átmeneti kvantumállapotot észlelt! Ha leírta volna, melyik átmeneti állapotot figyelte meg (ami pontosan egyenértékű azzal, mintha megfigyelte volna, melyik résen halad át a foton), akkor ezáltal az a valóság meghatározottá vált volna, ezért nem lehetett volna a párjával egyesíteni és ezáltal interferenciát létrehozni. „Mindez szükséges következménye annak, amit (a szuperagy) egyébként csinál, vagyis annak, hogy ki kell törölnie a memóriájából, hogy a két lehetőség közül melyiket figyelte meg.”⁶² A kísérlet eredménye - az interferencia - mindkét, együtt létező, átmeneti állapotot tartalmazza, ám a memória „egyetlen” állapotban van. Eszerint tehát a Világegyetemnek ketté kellett hasadnia. Vonzó egyszerűsége ellenére (legalábbis ami a feltevéseket, nem pedig a világok számát illeti), a sokvilág-elmélet bármely változatának további nehézségekkel kell szembenéznie. A legmeglepőbb, hogy

⁶²Az ebben a bekezdésben szereplő idézetek forrása: Davies és Brown: The Ghost mthe Atom, 99-100. oldal.

erőteljesen működik a távolhatás - ha végrehajtjuk a kétréses kísérletet, és lehetővé tesszük az interferenciakép kialakulását, akkor a téma Deutsch-féle variációja szerint a Világegyetem kettéhasadását és újraegyesülését meglehetősen lokális jelenségként észleljük, ami laboratóriumunk egyik szegletében játszódik le, ám nincs különösebb jelentősége a Világegyetem többi része szempontjából. Ha viszont meg akarjuk nézni, melyik lyukon megy át a foton, akkor ezáltal megakadályozzuk az interferencia kialakulását, ami azt jelenti, hogy a Világegyetem önmaga két másolatára hasadt, az egyik kópiában a foton az egyik résen megy át, a másikban a másikon. A Világegyetem egésze szempontjából valószínűleg nincs túlságosan nagy jelentősége annak, melyik résen ment át a foton, mindamellett, elvben ez a kettéhasadás pillanatszerűen az egész Világegyetem kvantumállapotát megváltoztatja.

Úgy tűnik, ez nem különösebben aggasztja Deuschot, részben azért, mert ő a hétköznapi, a múltból a jelenen keresztül a jövő felé folyó időről alkotott képünktől meglehetősen eltérő felfogást vall az időről. The Fabric of Reality című könyvében azzal érvel, hogy az idő nem „folyik”, és hogy nem létezik az az egyetlen pillanat, amelyet jelennek nevezhetünk, mert a jelen csak szubjektív fogalom. Ha az idő valóban nem „folyik”, folytatja (megismételve a J. W. Dunne által az 1930-as években felvázolt érvrendszert), akkor léteznie kell valamilyen másfajta időnek, amelyik annak a mérésére használható, ahogyan a „most” az egyik pillanatról a másikra előre felé halad. Egy harmadik idővel ennek az újabb pillanatnak a jövő felé haladását mérhetjük, és így tovább. Lehetnek különbségek a múlt és a jövő között - ezért tudjuk könnyen sorba rendezni az emberi élet különböző szakaszaiban készített, a csecsemőt, a gyermeket és a felnőttet ábrázoló képeket - ám ez nem szükségszerűen jelenti azt, hogy bármi is ténylegesen a múlttól a jövő felé haladna. Drámai gondolati ugrással Deutsch azt is megkockáztatja, hogy nincs különbség a más időpontokban, illetve a más világegyetemekben készített pillanatfelvételek között; eszerint tehát a „múlt” és a „jövő” csak Everett sok világának speciális esetei.

Ezzel már a mély vízbe jutottunk, amerre egyelőre nem szeretnék továbbmenni. Minthogy nem vagyok meggyőződve arról, hogy a sokvilág-téma Deutsch-féle variációja a legjobb, ha mindenekelőtt meg akarjuk érteni a kvantumvalóságot, ezért nem látom különösebben értelmét annak, hogy túlságosan belebonyolódjunk annak a részleteibe, milyen következményei lehetnek ennek a felfogásnak az időről alkotott képünkre.

Az egyik ok, amiért nem vagyok meggyőződve Deutsch igazáról, az, hogy úgy tűnik, még mindig túl széles lehetőségeket enged a méréseknek, a megfigyeléseknek (és az értelemnek) a valóság eseményeinek formálásában. Ha a „szuperagy” kísérletben interferenciát kapunk, amikor az agy csak annyit jegyez fel, hogy csupán egyetlen valóságot lát, de nem jelöli meg, melyiket, viszont nem kapunk interferenciát, ha az agy azt is feljegyzi, melyik valóságot látja, akkor visszaérkeztünk a fotonok rejtélyéhez, amelyek „mindkét útvonalat” bejárják a kísérletben, ha nem nézünk oda, ha viszont odanézzük, akkor csak az egyiket. Ami engem illet, jobban örülnék Everett elmélete naiv változatának, amelyben a Világegyetem állandóan a valóság sokféle változatává hasad fel, amely utód-

világegyetemek soha nem tudnak kommunikálni egymással. Az alaptémának azonban még nagyon sok további variációja létezik, amelyeket még meg kell említenünk, mielőtt valami mással kezdünk foglalkozni.

Variációk egy kvantumtémára

A sokvilág-elmélet volt a kvantummechanika értelmezésének egyik legdinamikusabban fejlődő területe, amióta Schrödinger macskája című könyvemet megírtam - elsősorban a már említett kozmológiai problémáknak köszönhetően. Az 1990-es évek közepén az elképzelések körül kialakult nyüzsgés elsősorban a téma két, egymással összefüggő variációja körül volt megfigyelhető, amelyeket „sokelme” vagy „soktörténelem” -értelmezésnek nevezhetünk.

Egy, a sokvilág-értelmezés által megnyitott új területeken dolgozó kutatók körében tartott, gyors névsorolvasás segíthet érzékeltetni milyen nagy érdeklődés mutatkozott meg a kérdés iránt. Korábban már említettem az oxfordi David Deutschot. Rajta kívül a kutatók e csoportjába tartozik még Dieter Zeh és Ernst Joos (Heidelbergi Egyetem), Claus Keifer (Zürichi Elméleti Fizikai Intézet), Jonathan Halliwell (Massachusettsi Műszaki Egyetem, MIT), Wojciech Zurek (Los Alamos-i Nemzeti Laboratórium), Thanu Padmanabhan (Tata Intézet, Bombay), Murray Gell-Mann (Kaliforniai Műszaki Egyetem, CalTech), James Hartle (Santa Barbara-i Kalifornia Egyetem), David Albert (Columbia Egyetem) és Barry Loewer (Rutgers Egyetem). Amikor a Physics Today című folyóirat 1991 októberében közölte Zurek egy cikkét a munka egyik részletéről, annyi olvasói reflexió érkezett, hogy csak a szerkesztőség által közlésre kiválasztott levelek Zurek válaszával együtt nyolc teljes oldalt töltöttek meg a Physics Today egy későbbi számában. Az 1990-es években a fizika világában óriási érdeklődés mutatkozott e kérdések iránt.

Zurek abban a bizonyos cikkében a kvantumvalóság megközelítésének egy másik vonatkozására is rámutat, éspedig a „dekoherencia” néven emlegetett jelenségre. Ez azzal az információval áll kapcsolatban, amely egy kvantummechanikai rendszerről ténylegesen rendelkezésünkre áll, illetve, amelyre a rendszer kvantumállapotának teljes leírásához szükségünk lenne.

Példaként vizsgáljunk meg egy elektront. A hidrogénatom elektronjának az állapota mindössze három számmal pontosan jellemezhető, amely három szám az elektron három „szabadsági fokának” felel meg (az egyszerűség kedvéért eltekintünk az elektron spinjétől). A helyzet hasonló ahhoz, amint a szobában lebegő léggömb helyét is három számmal tudjuk megadni, nevezetesen a két szomszédos faltól és a padlótól mért merőleges távolságával. A bonyolultabb rendszerek jellemzéséhez természetesen több paraméterre van szükség, mert ezeknek több szabadsági fokuk van. Általánosságban azt mondhatjuk, hogy a rendszer kvantumállapotának leírásához háromszor annyi számra van szükség, mint ahány részecske alkotja a rendszert.

Padmanabhan a macska klasszikus példájához folyamodik, hogy a helyére tegye a dolgokat.⁶³ Mint a szerző rámutat, az egy kilogramm tömegű macska mintegy 10^{26} atomot tartalmaz, tehát még ha el is tekintünk annak a leírásától, hogy mit csinálnak az egyes elektronok, akkor is mintegy háromszor ennyi paraméterre van szükségünk a macska kvantumállapotának leírásához. A macskáról adott szokásos leírásunk egyszerűen nem működik ezen a szinten, mert az egyszerű, „a szoba sarkában ül egy macska” kijelentésnek számtalan különböző kvantumállapot felel meg.

Az elképzelés hívei szerint a sok szabadsági fok elhanyagolásának hatása következtében az objektum - esetünkben a macska - „klasszikus”, nem pedig kvantummechanikai objektumként viselkedik. A szabadsági fokok elhanyagolásával „tesszük” a dolgokat klasszikus viselkedésűekké. Az értelmezés támogatói szerint ez a kétréses kísérlet esetében is igaz. Amikor rápillantunk az egyik lyukon keresztülhaladó fotonra, akkor elhanyagoljuk a másik lyuk létezését, miáltal klasszikussá változtatjuk a rendszer viselkedését. Ha viszont megengedjük, hogy a foton mindkét rést „lássa”, akkor a kísérlet leírásához minden szükséges információ a rendelkezésünkre áll, ezért a rendszer kvantummechanikai módon viselkedik.

A rendszer egyre inkább klasszikus viselkedésűnek tűnik, amint egyre nagyobb számban hagyjuk figyelmen kívül belső paramétereit. Ezen elmélet szerint, ha tudnánk készíteni egy olyan berendezést, amellyel a macskát jellemző összes paramétert megmérhetnénk, akkor megállapíthatnánk, hogy a macska éppoly kvantummechanikai viselkedést mutat, mint egy elektron, ezért igenis képes az élet és a halál állapotának a kombinációjában létezni.⁶⁴

Az általunk tett elhanyagolások következtében viselkednek tehát a dolgok klasszikusan, márpedig az elhanyagolás mértéke a nagyobb, több kvantummechanikai egységből felépülő objektumok esetében nagyobb. Ez magától értetődően azt sugallja egyes kutatóknak, hogy a „dekoherencia” révén számot adhatunk arról a tényről, miszerint a Világegyetem nagyban-egészében klasszikus rendszerként viselkedik.

Ez az a pont, ahol szerephez jut a „soktörténelem”. Zurek párhuzamot vont a Világegyetem kialakulása és jelenlegi képe, valamint stabil atomok és instabil, radioaktív atomok csoportja között. Az idő múlásával az instabil atomok közül egyre több bomlik el, és alakul át az atommagban lejátszódó folyamatok révén hosszú élettartamú atomokká. Bármilyen keverékből indulunk ki tehát, eredményül minden esetben stabil atomok összességét kapjuk. A kvantummechanika lehetővé teszi annak megbecslését, hogy a Világegyetem hány kvantumállapota eredeztethető az Ősrobbanásból. Zurek szerint „csak a bizonyosan stabil állapotok maradnak a színen”. Azok a változatok kerülnek a túlélők közé, amelyek jobban korrelálnak, lényegében önmagukkal. Az összefüggő történetet felvázoló történelmek nagyobb valószínűséggel maradnak a túlélők

63New Scientist, 1992. október 10.

64 Padmanabhan: New Scientist, 1992. október 10.

között, mint az eredendően előrejelezhetetlen történelmek. Éppen az előbbiek azok a történelmek, amelyek a legjobban megfelelnek a klasszikus leírásnak. Zurek ezt „előrejelezhetőségi szűrőnek” nevezi, és kijelenti, hogy „az előrejelezhetőségi szűrő által kiválasztott, tiszta állapotokról kiderül, hogy jól ismert, koherens állapotok”.⁶⁵

Padmanabhan fogalmai szerint a Világegyetem azért viselkedik úgy, mintha klasszikus lenne, mert rengeteg további, általunk elhanyagolt világegyetem, ennél fogva „sok történelem” létezik, amelyeket azonban elhanyagolunk. Ismét határozottan visszaköszönni látszik a Feynman-féle, a történetek összegzésével dolgozó tárgyalásmód. Új összetevő azonban az a követelmény, miszerint az általunk felfogott történetnek ellentmondásmentesnek kell lennie. Zurek értelmezésében központi szerepet kap a saját emlékeink és a múlt eseményeiről készült feljegyzések közötti összhang. E kép szerint az, amit felfogunk, nem az egész Világegyetem hullámfüggvénye, hanem csak a Világegyetem egy (vagy egy köteg) ágának néhány jellemző tulajdonsága, amelyek összhangban állnak mindazon eseményekkel, amelyeket a megfigyelő által a világról adott leírás tartalmaz. A megfigyelők emlékezhetnek bizonyos dolgokra, és egyetérthetnek más megfigyelőkkel abban, miként is játszódhatott le „a” Világegyetem története, bár léteznek más, az észlelők adott csoportja számára ismeretlen történelmek is.

1993 végén a kvantumfizikusok egy végrehajtható kísérletet javasoltak, amely eldönthetné, hogy valóban létezik-e a történelem, vagy az egyszerűen nem több a jelenlegi emlékeink következetes rendszerénél. Ez a Bell-egyenlőtlenség időbeli megfelelője. Egyes fizikusok érvelése szerint Bell leírása az egymástól független, de azonos pillanatban bekövetkező eseményekről megfordítható, és az ugyanazon a helyen (ugyanabban a kvantummechanikai rendszerben, de időben egymás után bekövetkező) események leírására is használható lehet. Jüan Paz a Los Alamos-i Nemzeti Laboratóriumban és Günter Mahler a Santa Fé Intézetben (mindkettő Új-Mexikó, USA) kimutatta, hogy ennek alapján a gyakorlatban végrehajtható kísérletet lehet tervezni, hogy valóban létezik-e a történelem abban az értelemben, amint azt hétköznapi gondolkodásunk diktálja.

A javasolt kísérlet azonosan előkészített rendszereken végrehajtott, ellenőrzött mérések sorozatát tartalmazza. Ideális alanyok lennének a berilliumionok, amelyben jól ismerjük az elektronok energiaszintjeit, és amelyeket hasonló kvantummechanikai kísérletekben már használtak - emlékezzünk csak vissza a harmadik fejezetben említett „kvantummechanikai Zénón-jelenség”-re. Ebben az esetben a berilliumionokhoz tartozó elektronoknak négy különböző energiaszint között kellene ide-oda ugrálniuk.

Az ionokat lézersugárral kellene előkészíteni, ez tartaná fenn a folytonos elektronoszillációt a kiválasztott energiaszintek közül valamelyik kettő között, majd ez váltaná ki az elektronok felugrását e két energiaszint mindegyikéről a két magasabban fekvő szint egyikére. Az „időbeli Bell-egyenlőtlenség” előrejelzése szerint a kísérlet végén az egyes energiaszinteken található elektronok száma

65 Physics Today, 1993. április.

meghatározott módon függ attól, ahogyan a lehetséges különböző átmeneteket kiváltottuk.

A kísérlet megvalósítható. Paz és Mahler kimutatta, miként lehet a végállapoton végrehajtott mérésből megállapítani, miként érkezett a rendszer az adott állapotba. Józan eszünkkel arra gondolnánk, hogy a történetnek folytonosnak kell lennie, ahol az elektronok egy jól meghatározott sorrendben különböző állapotok sorozatán keresztül jutnak el a kezdeti állapotukból a végállapotba. Bell azért állította fel az egyenletét ilyen formában, hogy az megfeleljen a hétköznapi, józan gondolkodásnak (ezért van az, hogy a Bell-egyenlőtlenség sérülése bizonyítja a „kísérteties távolhatás” létezését). Hasonlóképpen, a fenti kísérletek leírására a Bellével ekvivalens egyenleteket is azért írták fel, hogy azok összhangban álljanak a józan gondolkodással. Ha a kísérlet eredménye összhangban lesz az „időbeli Bell-egyenlőtlenség” állításával, akkor a józan ész győzedelmeskedik a kvantumvilág fölött. Ha azonban kiderül, hogy az időbeli Bell-egyenlőtlenség is sérül, akkor az azt bizonyítaná, hogy nem léteznek jól meghatározott „köztes” állapotok - vagyis, Paz és Mahler megfogalmazása szerint „a tényleges (tetszés szerint felállított kísérletben a végállapotetszés szerinti paramétereire vonatkozó) mérési eredmények közötti történelem nem része a valóságnak”.⁶⁶

A Bell-próba térbeli változatának analógiája alapján kijelenthetjük, hogy ha az egyenlőtlenség megsérül, akkor a különböző időpontban bekövetkező kvantumemesemények (a kezdő- és a végállapotok) korrelálnak egymással, mégpedig anélkül, hogy keresztül kellene menniük bármilyen köztes állapoton (tehát nem létezik valamiféle időbeli „pálya”). Az Aspect-kísérlet tanúsága szerint a kvantummechanikai objektumok úgy viselkednek, mintha a köztük lévő, őket egymástól elválasztó tér nem létezne. Az új kísérlet azt fogja bizonyítani (feltéve, hogy nem alapvetően hibás mindaz, amit a kvantumvilágról eddig megtudtunk), hogy a kvantummechanikai objektumok úgy viselkednek, mintha az őket egymástól elválasztó idő sem létezne.

Ezek után nyilván nem meglepő, ha a kvantumfizikusok arra számítanak, hogy a kísérletet elvégezve bebizonyosodik az egyenlőtlenség sérülése. Nos, minthogy a kísérlet nagyon hasonló ahhoz, mint amikor bekukucskáltunk a kvantumfazékba, egyáltalán nem lenne meglepő, ha addigra, mire ezek a sorok az olvasó kezébe kerülnek, már el is végezték volna a kísérletet. Meggyőződésem, hogy a kísérlet azt az eredményt fogja szolgáltatni, amire a kvantumfizikusok számítanak, vagyis az eredmény ellent fog mondani a józan ész várakozásának.

Mindez egyáltalán nem olyan riasztó, mint amilyennek hangzik, mert lényegében egy tisztán kvantummechanikai rendszer tulajdonságáról van szó. Ahol nagyon sok kvantummechanikai objektum alkot egy rendszert (például az emberi lények vagy a macska esetében), ott a kvantumosság elmosódhat, feltéve, hogy a „dekoherencia” elképzelése helytálló. Paz és Mahler szerint tehát „az időbeli Bell-egyenlőtlenségek sérülései eltüntethetők, ha növeljük a környezettel való kölcsönhatás erősségét”,⁶⁷ és a történelem a történészek számára valóságossá

66 Physical Review Letters 71 (1993), p. 3235.

67 Paz és Mahler: Physical Review Letters 71 (1993), p. 3235.

válhat, még ha az elektron számára nem is az.

Ám, amint az általában lenni szokott a kvantumfizikában, akadnak további értelmezések is, és az egyik szellemi irányzat szerint ugyan a történészek (meg mi, többiek) egy összefüggő történelemre „emlékeznek”, ez nem szükségszerűen jelenti azt, hogy valóban volt egy egyetlen és egyedi történelem. Az alternatív „sok elme” elgondolás javarészt David Albert munkássága nyomán került bele a képbe. Ezen elképzelés szerint, amikor egy értelmes lény kölcsönhatásba kerül egy kvantummechanikai rendszerrel, akkor ehhez az értelmes lény agyának egy bizonyos fokú bonyolultságára van szükség, aminek a mértékét a megfigyelt kvantummechanikai rendszer bonyolultsága határozza meg. Akárcsak Deutsch hipotetikus szuperagya esetében láttuk, az értelmes lény agyának annyi állapotra kell szakadnia, amennyire ahhoz van szükség, hogy minden lehetséges kvantumalternatívát képes legyen „látni” de tudata minden egyes felosztódott darabja csak a kísérlet egyetlen lehetséges kimenetelének megfigyeléséért felelős. Ha ténylegesen elvégezzük a „macska a dobozban” kísérletet, akkor Albert szerint a doboz fedelét felnyitva a kísérlet mindkét kimenetelét egyidejűleg látni fogjuk, és agyunk mindkét eredményt „reálisnak” fogja elkönyvelni. Ám agyunk két megnyilvánulása soha nem tudja egymással közölni a kísérlet kimenetelére vonatkozó érzéseit és hitét.

Nagy nehézséget okozott számomra, hogy mindezeket az elképzeléseket komolyan tudjam venni. Először is ezek a nézetek a tudat és az intelligencia problémáját visszataszítják a kvantummechanikai viták kellős közepébe. Másodszor, úgy tűnik, mintha ezáltal kihúznánk a talajt az egész kvantumvilág egyik legsarkalatosabb jellegzetessége, a kísérletek eredményének valószínűségi természete alól. Ha tudataim valamelyike a kísérlet minden egyes, lehetséges eredményét valóságosnak érzékeli, akkor mit jelent, amikor arról beszélünk, hogy a kísérlet egyik eredményének nagyobb a valószínűsége, mint a másiknak? Valóban a legjobb úton haladunk a kétségbeesett reménytelen helyzet felé, ha mindezeket az elképzeléseket komolyan vesszük. Ugyanakkor még távolról sem néztük végig a kvantummechanika értelmezéseinek rendelkezésünkre álló teljes kínálatát. Akad azonban még egy vagy kettő, amelyet mindenképpen meg kellene említenem, mielőtt arra kérném Önöket, hogy a valóság ismertetett modelljei közül bármelyiket is komolyan vegyék.

Kétségbeesett helyzetben

Ha a hagyományos felfogással való szembenállást keressük, nem kell messzire mennünk, elég, ha Roger Penrose-ra figyelünk. The Emperor's New Mind (A császár új elméje) című könyvében a 227. oldalon a következő, figyelemre méltó kérdést teszi fel: „Szükség van-e egy tudatos lény jelenlétére valamely »mérés« tényleges végrehajtásához?”, majd azonnal meg is adja az éppoly figyelemreméltó választ. Eszerint: „Azt hiszem, csak a kvantumfizikusok törpe kisebbsége fogadna el egy efféle vélekedést.” Ezután azonban kifejti saját variációját a kvantumtémára, amikor elfogadja, hogy a részecskék, például az

elektronok szétterülnek a térben, ahelyett, hogy egyetlen pontba koncentrálnának. Szívesebben gondolunk a „valószínűség” szétkenődöttségére, mintsem magáéra a részecskéére, állítja Penrose, azonban a kétréses kísérlettel kapcsolatban könyve 252. oldalán kijelenti, hogy „el kell fogadnunk, hogy a részecske valóban két helyen »van« egyszerre! Ennek értelmében a részecske ténylegesen egyszerre mindkét résen áthaladt.” Következtetése (298. oldal) azonban így szól: „Azt hiszem, a kvantummechanika rejtélyeinek a megoldását csak egy új, korszerűbb elmélet megalkotásától várhatjuk”, majd kifejezetten a távolhatás rejtélyére utal. A kvantummechanika legtöbb, bemutatott értelmezése számára a távolhatás a fő mumus. Az egyik lehetőség, hogy megszabaduljunk tőle, ha egyszer és mindenkorra elfelejtünk mindent, ami az egyedi kvantum-folyamatokban történik, például akkor, amikor a foton áthalad a kétréses kísérleti berendezésen, és kijelentjük, hogy a kvantummechanika tisztán statisztikus tudomány, amely csak azt képes leírni, hogy mi történik nagyszámú, ehhez hasonló mérés (sokaság) elvégzése esetén. Ezen sokasági értelmezés szerint megkérdezhetjük például, mi történik, amikor (mondjuk) ezer radioaktív atomot megfigyelünk a felezési idő elteltével. Ebben az esetben azt a korrekt választ kapjuk, hogy az atomok pontosan fele elbomlott, a másik fele pedig még nem. Azt azonban még csak meg sem kérdezhetjük, mi történik akkor, ha egyetlen radioaktív atomot figyelünk meg a felezési idő elteltével.

Ez a megközelítés évtizedekkel ezelőtt még ésszerűnek tűnt volna, amikor a kvantumfizika még csak nagyszámú kvantummechanikai objektum együttes megfigyelésével boldogult - ma viszont már kissé megmosolyogtató, hiszen a mai kísérleti technika már képes arra, hogy egyenként engedje be a fotonokat a mérőberendezésbe, ahol megfigyeljük önmagukkal való interferenciájukat. Mindamellett ezt a felfogást támogatja (mások mellett például) John Taylor (King's College, London), aki szerint „egyetlen más értelmezés sem kielégítő”. Sőt azt is hozzáteszi, hogy „a sokvilág-értelmezést különösnek érzem. Nem, én egy keményfejű fizikus vagyok. Minthogy elképzelésünk sincs arról, mi történhet más világegyetemekben, ezek fogalmát be sem kell vezetnünk.”⁶⁸

Még elkeseredettebb próbálkozás (legalábbis véleményem szerint) a kvantummechanika rejtélyeinek megoldására az a megközelítésmód, amelynek még az 1930-as években Neumann János volt az úttörője, és amely azt állítja, hogy a hétköznapi logika nem alkalmazható a kvantumvilágra. A hétköznapi logikát Boole-algebrának is szokták nevezni mert az 1815 és 1864 között élt George Boole ír matematikus volt az első, aki szimbolikus nyelvet és fogalmakat használt a tisztán logikai folyamatok leírására. Az elképzelései nyomán kifejlődött matematikai logikában az „és”, a „vagy” és az ehhez hasonló fogalmakat matematikai szimbólumok jelölik, a logikai érvelések pedig matematikai egyenletek formájában írhatók fel. A kvantummechanika rejtélyeinek megoldását célzó „kvantumlogikai” megközelítés szerint az olyan fogalmaknak, mint az „és” vagy a „vagy” nem ugyanaz a jelentése a kvantumvilágban, mint a hétköznapi életben, ezért például a hétköznapi gondolkodásunktól eltérő értelme van annak, ha azt állítjuk, hogy egy fotonnak vagy az egyik vagy a másik résen kell

68 Davies és Brown: The Ghost in the Atom, 109. és 106. oldal.

áthaladnia. Semmit sem tudok hozzátenni Heinz Pagels megjegyzéséhez, aki egy olyan ember választ írja le a kvantumvilág rejtélyeire, akinek az agya a kvantumlogika szerint jár:

Ha a kétréses kísérletről mesélünk neki, csak mosolyog, hiszen nem is érti, mi itt a probléma. Ma már látjuk, mi a gond a kvantumlogikával - ez sokkal szigorúbb korlátokat állít fel, mint a közönséges, Boole-féle logika. A kvantumlogikával nem tudunk olyan sok mindent bizonyítani, ezért nem fog el bennünket semmilyen furcsa érzés, ha a közönséges fizikai világot vizsgáljuk. A kvantumlogika elfogadása olyan lenne, mintha feltalálnánk egy új logikai rendszert, csak azért, hogy akkor is kitarthassunk a Föld sík volta mellett, ha szembe kellene néznünk a gömb alakja mellett szóló bizonyítékokkal.⁶⁹

Sokkal érdekesebb az a felfogás, amelyet John Bell talált ki, mely szerint nincs különbség a vezérhullám-elmélet és Everett elmélete között.⁷⁰ Everett eredeti ötletének az volt a lényege, hogy minden megfigyelőt egy kvantum-„memóriaállapot” határoz meg, amelynek értelmében a megfigyelő egy többé-kevésbé összefüggő „történelemre” emlékszik. A valóságok elágaztatásának gondolata és ennek nyomán a párhuzamos világok sokaságának létrehozása csak később merült fel. Bell érvelése szerint ez csupán az elképzelés sikertelen és szükségtelen kiegészítése volt. A lényeges elem, amit Bell szerint Everett-től át kell venni, az a megállapítás, hogy nem tudunk közvetlenül hozzáférni a múlthoz, csupán emlékeinkhez, amelyek maguk is részei a Világegyetem pillanatnyi kvantumállapotának (és ennél fogva nem lokálisak, azaz távolható jellegűek!).

A „Világegyetemek megsokszorozása különbség”, tartja Bell, „és bármiféle káros következmény nélkül elvethető”, meg kell viszont tartanunk a hullámegyenlet által leírt valóságok potenciális rendszerének fogalmát. Ez a vezérhullám-elméletre hasonlít, ahol maga a hullám soha nem lokalizálódik vagy „redukálódik”, jöllehet bármely pillanatban csak a hullámhoz kapcsolódó változóknak csupán egyetlen rendszere „realizálódik”. Ha megköveteljük minden egyes univerzum valóságosságát, akkor ez Bell érvelése szerint olyan lenne, mintha arra számítanánk, hogy a tér minden pontjában, ahol elektromágneses tér van jelen, egyúttal egy töltött elemi részecskét is találnánk. Bell szívesebben hangsúlyozta azt, hogy Everett értelmezése a valóságot a kvantummechanikai hullámegyenlet összes lehetséges megoldása eloszlásaként írta le anélkül, hogy a különböző konfigurációk párokba rendeződnének. Ha a konfigurációk nem alkotnak párokat (Deutsch megközelítése szerint) nem létezik az idő „múlása”, „nincs kapcsolat a „meghatározott jelen és bármely meghatározott múlt között”, továbbá:

A hullámfüggvény szerkezete nem szükségszerűen hasonlít a fa ágaira. Nem kapcsol össze jobban egy meghatározott, a jelennek megfelelő ágat a múltat képviselő ággal, mint bármelyik meghatározott, jövőbeni ággal. Sőt mi több, még az is ésszerűnek látszik, hogy a korábban különböző ágak egyesítését, és az

69 Pagels: The Cosmic Code, 180. oldal.

70 Bell: Speakable and Unspeakable, 15. fejezet.

ennek eredményeképpen fellépő interferencia jelenségét a kvantummechanika egyetlen alapvető jellegzetességének tekintjük. Ebben a vonatkozásban a fához hasonló szerkezetet nem mutató, mégis pontos képnek tekinthető a történetek Feynman-féle összegezése.

Bell azonban nem a sokvilág-értelmezés támogatójaként szólalt meg, egyszerűen csak a lehető legvilágosabban be akarta mutatni az elképzelést. Rámutat, hogy „amikor Everett a múltat emlékekkel helyettesíti, akkor radikálisan szolipszista felfogást vall (szolipszizmus: a „csak magam vagyok” elve a filozófiában - a fordító megjegyzése) - az időbeli dimenziót benyomásain keresztül mindenre kiterjeszti, ami a fejemen kívül van ... ha egy ilyen elméletet komolyan vennénk, akkor aligha lehetne bármi egyebet komolyan venni”. Még Bell sem képes azonban rászánni magát arra, hogy végérvényesen elvesse a fogalmat. Ugyanebben a könyvében később (194. oldal) így fogalmaz: „csaknem elvettem, mint ostobaságot. És mégis ... talán tud valami sajátosat mondani az Einstein-Podolsky-Rosen-rejtéllyel kapcsolatban, ezért azt hiszem, talán érdemes lenne megfogalmazni az elképzelés valamilyen pontos változatát, és megvizsgálni, hogy valóban igaz lehet-e”. Mindezt egy olyan ember írja, aki (ugyanazon az oldalon) azt is elmondja, hogy „soha nem tudtam megragadni a komplementaritás igazi értelmét, és boldogtalanná tesznek az ellentmondások”, és akinek volt mersze ostobaságnak minősíteni és elvetni Neumann János rejtett változókra vonatkozó érvelését. Ezzel nagyon közel jut a sokvilág-értelmezés támogatásához, noha Bell igazán csak a vezérhullám képét támogatta, mint fogalmilag tiszta és önmagában egyszerű képet, ugyanakkor azonban ráirányította a figyelmet a kvantumvilág alapvetően nemlokális jellegére, miáltal rávilágított arra a problémára, amelyet minden kielégítő elméletnek valahogyan meg kell oldania.

Két ok miatt tértem vissza a sokvilág-értelmezéssel kapcsolatos eltérő nézethez. Egyrészt azért, mert a hagyományos értelmezések közül továbbra is ez számomra a legszimpatikusabb, és ha kénytelen lennék most kiválasztani a legjobb ajánlatot a széles kínálatból, akkor ezt választanám. Másrészt azért, mert Bell magyarázata arról, mi is történik valójában a valóság sokvilág-változatában, világossá teszi az idő szerepét a kvantumvilágról vallott felfogásunk meghatározásában (bizonyos mértékig ugyanebben segítenek Deutsch próbálkozásai is). Van valami nagyon trükkös dolog az idővel kapcsolatban, és ez a trükk bensőséges kapcsolatban áll a kvantumvalóság természetével, valamint a kvantummechanika és a hétköznapi világ egyenletei összeegyeztetésének problémájával.

Mindez a kvantummechanika rejtélyei megoldásának alapvetően újszerű megközelítéséhez vezetett el, amely lényegében a hétköznapi világ törvényeiből kiindulva próbál egyre mélyebbre hatolva megközelíteni valamiféle kvantummechanikai igazságot. Mielőtt azonban megismerkednénk ezzel az új megközelítéssel, érdemes kis kitérőt tenni és szemügyre venni a kvantummechanika és a relativitáselmélet közötti összjátékot. A Világegyetem működésének bármely, megfelelő leírásában (itt a „mindenség elméletének” keresésére gondolunk) nyilvánvalóan meg kell találni a módot ennek a két nagy elméletnek az ellentmondásmentes egyesítésére, erre azonban itt nem szeretnék részletesebben kitérni. Ehelyett inkább azokat a területeket szeretném bemutatni,

ahol a két elmélet nem jól illeszkedik - vagy legalábbis azokat, ahol a kvantumelmélet összeegyeztethetetlennek tűnik a speciális relativitáselmélettel.

Relativisztikus részletkérdés

A problémát ezúttal is Bell fogalmazta meg kristálytisztán. A speciális relativitáselmélet kulcsfontosságú alaptétele értelmében a Világegyetemnek és a fizika törvényeinek minden megfigyelő számára ugyanolyannak kell látszaniuk, függetlenül attól, milyen mozgást végez a megfigyelő (ám emlékeztetünk rá, hogy a speciális relativitáselméleten csak állandó sebességű mozgásokkal foglalkozunk, gyorsulásokkal nem). Ezt az elvet Lorentz-invariancia néven ismerjük, bár mint a második fejezetben láttuk, nem Lorentz volt az egyetlen, aki ezt a jelenséget már évekkel Einstein színre lépése előtt tanulmányozta. Aspect kísérlete arra tanít, hogy el kell vetnünk a lokális valóság fogalmát, ezért vagy az „odakint” látott Világegyetem nem valóságos, vagy pedig léteznie kell a fénysebességnél gyorsabb kommunikáció valamilyen formájának, azaz Einstein „kísérteties távolhatásának”. Bell javaslata szerint a rejtély „legolcsóbb megoldása” az lehetne, ha visszatérnénk a relativitáselmélet Einstein előtti változatához, tehát ahhoz az elmülethez, amelyet Lorentz és mások abból a feltevésből kiindulva alkottak meg, hogy valóban létezik az éter.⁷¹

Az ilyen elképzelések szerint valójában létezik ugyan egy kitüntetett vonatkoztatási rendszer, ám (ehhez képest végbemenő) mozgásunk következtében mérőműszereink pontosan olyan mértékben torzulnak, hogy soha nem tudjuk kimutatni az éteren keresztül (ahhoz képest) végzett mozgásunkat. Ennek a szemléletmódnak van egy nagy előnye. Minthogy létezik kitüntetett vonatkoztatási rendszer, kiderül, hogy bár ebben a kitüntetett vonatkoztatási rendszerben a dolgok képesek a fénysebességnél gyorsabban haladni, bármely más vonatkoztatási rendszerben csak valamiféle optikai csalódás lehet, ha azt tapasztaljuk, hogy valamilyen hatás a fénynél gyorsabban terjed. Ha létezik kitüntetett vonatkoztatási rendszer, akkor a kitüntetett rendszerben az órák kitüntetett sebességgel járnak - két legyet ütöttünk tehát egy csapásra, a Newton-féle abszolút tér mellett a Newton-féle abszolút időt is visszaállítottuk. A fénysebességnél gyorsabb haladás csak a relativitáselmélet Einstein-féle változatában jelent „valódi”, az időben visszafelé történő mozgást, mert ebben az elméletben az összes Lorentz-féle vonatkoztatási rendszer egyenértékű.

Bell ezeket az elképzeléseit abban a cikkében fejtette ki, amelyik később *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* című könyve kilencedik fejezetét alkotta. Kimutatta, hogy a kitüntetett vonatkoztatási rendszer Einstein előtti képét használva, továbbá figyelembe véve azt a kísérletileg igazolt tényt, miszerint nem tudjuk kimutatni a kitüntetett vonatkoztatási rendszerhez képest végzett mozgásunkat, eljutunk a Lorentz-féle transzformációs egyenletek megszokott formájához. Eszerint tehát (77. oldal) „nem lehetséges kísérleti úton

71 Davies és Brown: *The Ghost in the Atom*, 48. oldaltól.

meghatározni, hogy két, egyenletes sebességgel mozgó rendszer közül nyugalomban van-e valamelyik, és ha igen, akkor melyik”. Einstein elmélete, amint azt Bell kimutatja, csak filozófiájában és stílusában különbözik Lorentzétől. A filozófiai különbség a következő: minthogy lehetetlen megmondani, hogy a két mozgó rendszer közül (ha egyáltalán mozog valamelyik) melyik van valójában nyugalomban, és melyik végez tényleges mozgást, ezért a „tényleges nyugalom” és „tényleges mozgás” fogalmaknak nincs értelmük, csak a relatív mozgás a fontos. A stílusbeli különbséget az jelenti, hogy Einstein abból a hipotézisből indul ki, miszerint a fizikai törvényeknek minden egyenletes mozgást végző megfigyelő számára ugyanolyanoknak kell látszaniuk, majd ebből egyszerűen és elegánsan levezeti a Lorentz-transzformációkat, ahelyett, hogy a kísérleti bizonyítékokból kiindulva, hosszabb utat bejárva jutna el ugyanaddig a végcélra. Ahogyan mondjuk a koppenhágai értelmezés vagy a sokvilág-értelmezés ugyanazt a „választ” adja a kvantummechanikai problémákra, éppúgy a relativitáselmélet Lorentz-féle változata és Einstein speciális relativitáselmélete is ugyanolyan „válaszokat” ad minden gyakorlati helyzetben. A két elmélet azonban különbözőképpen értelmezi a lejátésczóó eseményeket.

Bell ötletét-saját álláspontunktól függően vagy forradalminak, vagy reakciónak tekinthetjük. Természetesen az elképzelés manapság fizikus körökben nem örvend széles támogatottságnak. Amint azonban Bell kajánul kijelentette, létezik legalább egy módszer, amellyel nem kell visszatérnünk az Einstein előtti relativitáselméletekig. „Tudod”, mondta Paul Daviesnek, „az egyik lehetőség ennek az egész ügynek a megértésére az, ha feltételezzük, hogy a világ szuperdeterminált”.⁷² Más szavakkal, minden, a legapróbb részletekig előre meghatározott, beleértve a kísérletező döntését is, hogy az Aspect-kísérletben milyen mérést akar elvégezni. Ha a szabad akarat pusztá illúzió, akkor kimászhatunk a kutyaszorítóból. De ha egy ilyen elméletet komolyan vennénk...

Ha viszont csak annyit mondunk, hogy a speciális relativitáselmélet esetleg a világ szemléletének nem a legjobb módja, akkor végső soron ez a kijelentés nem különösebben megrázó, hiszen még az elmélet megnevezése is azt sugallja, hogy nem ez a tudomány utolsó szava a relativitáselméletek világában. Az elmélet nem teljes, mert - ellentétben az általános relativitáselmélettel - nem foglalkozik a gyorsuló mozgásokkal vagy a gravitációval.

Nos, megígértem, hogy nem bocsátkozom bele az általános relativitáselmélet részleteibe, ám mivel most csupán kis kitérőt teszünk, kicsit megszegem az ígéreteimet és megemlítem az elmélet néhány szembeötlő jellegzetességét. Az általános relativitáselmélet a gravitációt a téridő görbületével írja le. Egy bizonyos, a Napból kiinduló, és a Földet a pályáján tartó, (gravitációnak nevezett) titokzatos távolhatás helyett inkább arra kell gondolnunk, hogy a Nap egy „bemélyedést” hoz létre a téridőben, hasonlót ahhoz, amilyent a megfeszített gumilepedőre helyezett tekegolyó a gumifelület alakjában létrehozna. Ha a görbült téridőben a legkisebb ellenállás irányában akarunk haladni, akkor a Földnek a Nap körül kell keringenie éppúgy, ahogyan egy kis üveggolyó keringeni

kezdene a gumilepedőn a nagy golyó által létrehozott mélyedés körül.

Elvben a Nap (vagy bármilyen más test) gravitációs hatása Világegyetemben a végtelenig elér, bár a téridő Nap által létrehozott görbülete egyre kisebb és kisebb lesz, amint távolodunk a Naptól. Ha a tömegek a téridőben ide-oda ugrálnak, az a gravitációs hatás változását okozza, ami fénysebességgel szétterjedő hullámokat kelt (hasonlóakat azokhoz a felületi hullámokhoz, amelyek a megfeszített gumilepedőn is kialakulnak, ha fel-le rázogattjuk a tekegolyót). A gravitációs hullámok kialakulását Einstein általános relativitáselmélete jósolta meg, létezésüket a közelmúltban egy kettős pulzárnak nevezett égitest megfigyelésével sikerült igazolni. Ebben a rendszerben két nagyon sűrű csillag kering egymás körül, miközben a rendszer gravitációs hullámok formájában olyan sok energiát veszít, hogy ennek következtében keringési periódusuk kimutatható mértékben megváltozik. A periódus változásának megmért nagysága pontosan megfelel az általános relativitáselmélet által megjósolt értéknek. Ezt a felfedezést olyan jelentősnek ítélték, hogy a felfedezők (Russell Hulse és Joe Taylor) eredményükért 1993-ban megkapták a fizikai Nobel-díjat.

Bár a gravitációs sugárzás fénysebességgel terjed, mégis inkább azt érezzük, mintha egy égitest gravitációs hatása valahogy távolhatással működne. A megszokott kép szerint a gravitációs mező a térben (pontosabban a téridőben) mindig, mindenhová eljut. Ez egy másik, a kutatókat már sok évtizede aggasztó rejtéllyel állhat kapcsolatban, nevezetesen a tehetetlenség rejtélyével. A világűrben, ahol nincs közegellenállás és súrlódás, a meglökött test állandó sebességgel és változatlan irányban mozog mindaddig, amíg valamilyen más lökés nem éri. A test mozgási irányának vagy sebességének megváltoztatásához energiára van szükség. Ez olyan alapvető jelentőségű állítás, hogy az állandó sebességgel mozgó, Lorentz-invariáns vonatkoztatási rendszereket gyakran egyszerűen csak „inerciarendszernek” nevezik (inercia = tehetetlenség - a fordító megjegyzése). De vajon honnan tudja a test, hogy mozgásállapota változik (vagy éppen nem változik)?

Egy csaknem teljesen üres világegyetemben, amelyik mindössze egyetlen részecskét tartalmazna, a mozgás fogalma értelmét veszítené, hiszen nem létezne olyan vonatkoztatási pont, amelyhez a mozgást viszonyítani lehetne. Mihelyt azonban legalább még egy részecske jelen van a Világegyetemben, akkor már van mihez viszonyítani a mozgást. Ha csak egyetlen részecske lenne a Világegyetemben, akkor aligha lehetne megállapítani, van-e a részecskének egyáltalán tehetetlensége. Vajon ha csupán egyetlen további részecskét adunk hozzá a Világegyetemhez, akkor ez már elegendő ahhoz, hogy az első részecske tehetetlensége egyik pillanatról a másikra, mintegy varázsütésre megjelenjék? Vagy esetleg a tehetetlenség egyre nőne, ahogy több részecskét helyezünk bele a hipotetikus univerzumunkba? Senki sem tudja. Ám a Világegyetemben, az általunk megismert formájában a valóságos objektumok tényleges viselkedése - a húzó vagy toló erőhatásokra adott tehetetlen válaszaik - arra enged következtetni, hogy sebességüket a Világegyetemet alkotó anyag átlagos helyzetéhez „méri”.

Az elmondottakat Mach-elvként ismerjük a fizikában. Ernst Mach (1838-1916) osztrák fizikus volt, aki jelentős hatást gyakorolt Einsteinre, amikor az általános relativitáselméleten dolgozott. Furcsa módon az általános relativitáselmélet Einstein erőfeszítései ellenére tulajdonképpen nem ad magyarázatot a Mach-elvre és a tehetetlenség eredetére. Még ennél is furcsább, hogy Mach nem kedvelte Einstein elméletét, bár ő maga is ösztönzőleg hatott a relativitáselmélet megszületésére. A rejtély tehát továbbra is megoldatlan. Hogyan képes a meglökött test pillanatszerűen felbecsülni, miként fogja ez a lökés befolyásolni a Világegyetem összes anyagához képest a mozgását, és hogyan képes a test a lökésre ennek megfelelően reagálni? Megint visszajutottunk a távolhatás kísérteties birodalmába - ám ezúttal nem a kvantumelméletben, hanem Einstein saját mesterművében, az általános relativitáselméletben!

A speciális relativitáselméletet, amely megtiltja a fénysebességnél gyorsabb kommunikációt, nem tekintjük teljesnek a Világegyetem leírásában. Ráadásul, amint azt Bell kimutatta, az elmélet minden gyakorlati problémára ugyanazokat a válaszokat adja, mint Lorentz elmélete, márpedig az utóbbi megengedi a jelek fénysebességnél gyorsabb továbbítását. Másrészt viszont úgy tűnik, mintha az általános relativitáselmélet, amely sokkal átfogóbb és kielégítőbb a speciális elméletnél, valahogyan saját szerkezetébe beépítve mégiscsak tartalmazná a távolhatást. Végül, mint azt bizonyára már Önök is észrevették, ha van valamennyi igazság a Mach-elvben, akkor létezik a Világegyetemben egy kitüntetett vonatkoztatási rendszer, akár létezik az éter a maga fizikai valóságában, akár nem.

Tudjuk, hogy a Világegyetem tágul, és a kitüntetett vonatkoztatási rendszerben, amelyet a Világegyetem összes anyagának eloszlása határoz meg, ugyancsak végbemegy ez a minden irányban egyenletes tágulás. Azt is tudjuk, hogy az Ősrobbanáskor, vagyis a Világegyetem születésekor csak egy forró tűzgömb volt jelen, amely az egész Világegyetemet elektromágneses sugárzással töltötte ki. Ez a sugárzás azóta lehűlt, ma gyengén sustorgó rádiózajként lehet megfigyelni. A sugárzás hőmérséklete mára 3 Kelvin-fokra (azaz valamivel $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ alá) csökkent, de továbbra is kitölti az egész Világegyetemet, és a híresnevezetes mikrohullámú kozmikus háttérsugárzás formájában figyelhető meg. A Világegyetem kitüntetett vonatkoztatási rendszeréhez képest nyugalomban lévő megfigyelő egyúttal a kozmikus háttérsugárzáshoz képest is nyugalomban van. Maga a fény (ebben az értelemben az elektromágneses sugárzás minden fajtáját „fénynek” nevezhetjük) szolgáltatja számunkra a kitüntetett vonatkoztatási rendszert.

A helyzet lassacskán egyre bonyolultabbá válik, az említett kérdések némelyikére a későbbiekben még visszatérek. Először azonban lássuk új megvilágításban a kvantummechanika régi rejtélyeit.

Kísérlet az idővel

Az idő természetének kérdése a világ mindenfajta természettudományos

vizsgálata szempontjából alapvető jelentőségű. A kvantumfizikában a Világegyetem „megmértetlen” állapota az összes lehetséges állapot szuperpozíciója, ezért a fizikának (elvben legalábbis) az összes állapotról számot kell adnia. A sokvilág-elmélet Deutsch és mások által kidolgozott, modern változatában nem ágaznak szét a világegyetemek, mert az összes lehetőség „mindig” létezik - ezért szerepel itt végtelenül sok világegyetem, amelyek egymással azonos kezdőállapotból „indultak”. A kvantummechanikai mérés folyamata nem idézi elő valamely világegyetem kettéhasadását, hanem másképpen változtatja meg az alternatív univerzumokat, mert a különböző világokban különböző a kísérlet eredménye - az egyikben a macska élve marad, a szomszédos világegyetemben elpusztul, ám a kísérlet megkezdése előtt mindkét univerzumban jelen volt egy élő macska (sőt a két világegyetem a kísérlet megkezdéséig megkülönböztethetetlen egymástól). Ebben a helyzetben csak egyetlen értelemben létezik az idő valamiféle iránya, nevezetesen az univerzumok sokaságának bizonyos állapotai bonyolultabbak, mint mások. A bonyolultság a jövő - mert ez a sok, különféle kvantummechanikai mérés sokféle lehetséges eredményének következtében áll elő -, az egyszerűség a múlt.

Amikor azonban sok részecskét egybegyűjtünk, és lehetővé tesszük a kölcsönhatásukat, akkor a rendszer bonyolultságával összefüggő tulajdonságok (amelyeket rendszerint a fizika termodinamikának nevezett ága fogalmaival írunk le) jutnak szerephez. Ez látszik kijelölni az idő múlásának az irányát. A klasszikus példában az asztalról leeső pohár összetörik, mihelyt eléri a padlót, és az esés közben szerzett energia a padlót csekély mértékben felmelegítő hő formájában elnyelődik. Soha nem tapasztaljuk, hogy a padló energiát adna át az üvegcserepeknek, amiktől azok pohárrá állnának össze, majd az ép pohár felugrana az asztalra, miközben a padló csekély mértékben lehűlné. A jelenséget annak ellenére nem figyelhetjük meg, hogy az atomok és a molekulák szintjén a dinamika egyenletei (a newtoni fizikában és a kvantummechanikában egyaránt) ebben az irányban ugyanúgy működőképesek.

Különösen sokat foglalkozott a bonyolultság kérdésével és az idő irányával, valamint a káoszról előbukkanó renddel Ilya Prigogine. Oroszországból született 1917-ben, de 12 éves korától kezdve Belgiumban élt. 1977-ben megkapta a kémiai Nobel-díjat, azóta (2003-ban bekövetkezett haláláig - a fordító megjegyzése) energiája legnagyobb részét a Világegyetem működése új értelmezése kidolgozásának szentelte. Prigogine kidolgozta a nemegyensúlyi rendszerek működésének matematikai modelljét, munkássága közvetlenül kapcsolódott az élet kialakulásának és fejlődésének vizsgálatához és (talán) a kvantummechanikai mérések rejtélyes jelenségeinek a tisztázásához.

Prigogine érvelésének a lényege, hogy az igazi valóságot a komplex rendszerek viselkedésén alapuló, kísérleti úton meghatározott termodinamikai törvények jelentik. Ezzel szemben az atomok viselkedésének naiv képe, amelyben kis golyók ütköznek egymással és pattannak vissza egymásról, lehetővé téve a folyamatok lejátszódását időben visszafelé is, nyilvánvalóan csak közelítő leírást ad a valóságról. A termodinamika törvényeit kell szó szerint elfogadni, nem pedig a Newton-törvényeket (és nem is a Schrödinger-egyenletet). Amikor valamely

rendszer pontosan követi a Newton-törvényeket, akkor a rendszert integrálhatónak nevezzük. Ilyen például egyetlen bolygó keringése egy magányos csillag körül. A mozgás integrálható, aminek eredményeképpen a bolygó pozíciója bármely jövőbeli vagy múltbeli időpontra kiszámítható, feltéve, hogy ismerjük a bolygó pályáját és jelenlegi helyzetét leíró paramétereket. Ám elegendő csupán egyetlen további testet hozzáadni a rendszerhez, megalkotva az úgynevezett háromtest-probléma által tárgyalt helyzetet, és az egyenletek attól kezdve már nem lesznek integrálhatóak.

Ennek nem az az oka, hogy a matematikai egyenletek bonyolultabbak, ha több test mozgását akarjuk vizsgálni. Egész egyszerűen - elvben is - lehetetlen megoldani őket. Ha kis lépésenként haladunk előre, akkor ésszerű pontossággal ki tudjuk számítani, hol lesznek az egyes testek bizonyos idő elteltével. Ehhez fel kell tételeznünk, hogy két test nyugalomban van, majd ki kell számítanunk, miként mozdul el a harmadik az előző kettő együttes gravitációs terében. Csupán kicsiny elmozdulást szabad azonban megengednünk, majd megállítjuk ezt a testet, és a másik kettő közül valamelyiknek hasonló módon kiszámítjuk a létrejövő elmozdulását. Ezután a harmadik testre is megismételjük az eljárást, és így tovább. A munka még gyors számítógépek segítségével is unalmas és fárasztó, ráadásul nem is tökéletesen pontos. A módszer a Naprendszer bolygói mozgásának kiszámítása esetében meglehetősen jól működik, mert a Nap sokkal nagyobb tömegű, mint a bolygók (valójában sokkal nagyobb, mint az összes bolygó együttvéve), ezért a számításokban a Nap hatása dominál. Ha a bolygók mindegyike ugyanakkora tömegű lenne, mint a Nap, akkor még a közelítő számítások is sokkal bonyolultabbak lennének. Különböző „válaszokat” kapnánk, attól függően, milyen sorrendben indítjuk el és állítjuk meg gondolatban az egyes bolygókat. Valójában nincs semmilyen lehetőségünk annak pontos előrejelzésére, miként alakul az idő múlásával a három égitest pályája (nem is beszélve az olyan bonyolult rendszerekről, mint a Naprendszer). Hasonlóképpen, arra sincs mód, hogy ezekben az esetekben pontosan kiszámítsuk, miként fejlődtek a pályák a múltban, mire elérték a ma megfigyelhető állapotukat.

Az elmondottak már akkor is igazak, ha csupán három kölcsönható test mozgásáról beszélünk. Emlékezzünk csak vissza, a macskát nem három, hanem nem kevesebb mint 10^{26} „részcseke” építi fel. A kvantumelmélet gyönyörű, időben szimmetrikus egyenleteit csak akkor szabad alkalmazni, ha a kölcsönhatásban csak két-három részcseke vesz részt. Prigogine szerint az „integrálhatatlanság” minden, a valóságnak megfelelően bonyolult rendszernek alapvető jellegzetessége. Márpedig, ha valami nem integrálható, akkor még elvben sem lehet az idő kerekét visszafelé forgatva nyomon követni a múltját. Az összetört pohár akkor sem állítható helyre, ha a padló atomjai egymással együttműködve energiát adnak át az üvegcserépeknek, miközben ők maguk lehűlnek.

Bizonyos értelemben Prigogine megközelítése visszavezet az eredeti koppenhágai értelmezés megfontolásához. A fizikában egy dolog számít, mondja, a valódi, „klasszikus” eszközökkel (például Geiger-számlálókkal és hasonlóakkal) elvégzett mérések, miközben csak közelítőleg tudjuk megérteni, mi történik valójában a

mérőeszköz belsejében. Ahogy Alastair Rae megfogalmazza:

Definíció szerint nincsenek tapasztalataink a reverzibilis, tiszta kvantummechanikai „eseményekről”, amelyeket nem detektálunk ... A klasszikus fizika törvényeit egy kétségbe soha nem vont feltevés alapján állították fel, e feltevés szerint bár az események megfordíthatóak, mindig csak arról lehet beszélni, ami valóban megtörtént. Még Einstein relativitáselmélete is jelentős részben arról szól, hogy jeleket küldünk ki, ami nyilvánvalóan irreverzibilis mérés típusú folyamat. Talán nem lenne meglepő, hogy ha megpróbálnánk megalkotni egy a lehetséges megfigyelések hátterébe, a reverzibilis folyamatok birodalmába is benyúló képet, akkor modellünk olyan nyilvánvaló ellentmondásokat tartalmazna, mint a hullám-részecske kettősség és az EPR kísérletben megfigyelt térbeli delokalizáció.⁷³

Mindezek izgalmas és új ötletek, amelyeket egyelőre még távolról sem fogadnak el széles körben, ám amelyek bizonyára az elkövetkező évtizedben viták tárgyát fogják képezni, és ilyen vagy olyan módon tovább is fejlődnek. A hangsúly azon a lehetőségen van, hogy ami a koppenhágai értelmezésben fontos - az a pont, amelynél a „mérés” eldönti, merrefelé fog a kvantumvilág továbbugrani - az egy irreverzibilis változás (mint például a macska halála vagy prózaibb példával élve, amikor tollal jelet teszünk a felvételt készítő eszközre) előidézése a Világegyetemben. Számomra úgy tűnik, hogy a bökkenő ott van, hogy mind a mai napig nincs valóban kielégítő magyarázatunk a Rae által említett, az EPR kísérletben megfigyelt távolhatásra. Minden arra utal, hogy a kvantumvilág meglepő dolgokat tartogat még a számunkra, ám Prigogine megközelítésében még a távolhatás gyanúja sem merül fel, miközben a kétréses kísérletben és az Aspect-kísérletben felbukkant távolhatás valahol a kvantummechanika rejtélyeinek lényegével áll kapcsolatban. Amint Brian Josephson, a Cambridge Egyetem Nobeldíjas fizikusa megjegyezte, korunk fizikájának legfontosabb fejleménye annak kísérleti bizonyítása, hogy a valóságos világban a Bell-egyenlőtlenség sérül.⁷⁴ Persze attól még, hogy a mérés folyamatát álrúhába öltöztetjük, az továbbra is igaz marad, hogy az A fotonon végrehajtott mérés ugyanabban a pillanatban meghatározza a B foton állapotát, amely akár a Világegyetem áttellenes részében is tartózkodhat.

Prigogine ajánlata tehát számomra nem tűnik a „legjobb vételnek”. Azzal azonban egyetértek, hogy a reverzibilitás kérdése és egyes alapvető egyenletek időben szimmetrikus viselkedése kulcsfontosságú a kvantumvalóság pontos megértése szempontjából. Rae egy másik, ugyancsak felettébb helyénvaló megjegyzést is idéz Prigogine-től: „Egy elemi részecske, neve ellenére nem olyasvalami, amit készen »kapunk«, azt nekünk magunknak kell megalkotnunk”.⁷⁵

A lényeg az, hogy minden, amit a kvantumvilágról „tudunk”, a mindennapi világban végzett megfigyeléseken és következtetéseken alapul. A fizikusok

73 Rae: Quantum Physics, 109. oldal.

74 Idézi: Davies és Brown: The Ghost in the Atom, 45. oldal, a teljes forrásra nem hivatkoznak.

75 Idézi: Rae: Quantum Physics, 109. oldal, a teljes forrásra nem hivatkozik.

modelleket készítenek, amelyek a dolgok mélyén rej-tőző igazság valamilyen közelítései (legalábbis ezt remélik). Gyakran elfelejtenek azonban különbséget tenni a modellek és maga a valóság között, miközben a világ működéséről alkotott gondolatainkat még előítéleteink és a bennünket érő kulturális hatások is színesítik. Ha tisztán akarjuk látni, mi az, amit valóban értünk a kvantumvilág működéséből (ha egyáltalán van, amit értünk), akkor meg kell próbálnunk megérteni, mire is gondolunk pontosan, amikor „megértésről” beszélünk. Ne keseredjenek el: nem szándékozom belemerülni a miszticizmus, a filozófia és a pszichológia zavaros mélységeibe. Továbbra is érdemes azonban megfigyelni, miként gondolkodunk általánosabb értelemben a dolgokról, mielőtt megpróbáljuk a különféle, rendelkezésre álló kvantumvalóságokat értékelni, és eldönteni, melyiket a legérdekesebb közülük elfogadni és miért.

5. Elmélkedés a dolgokról való elmélkedésről

A fizikusok világa fotonokból áll. A kijelentés két szinten is igaz. Egyrészt, a hétköznapi dolgok atomokból állnak. Ha meg akarjuk érteni közvetlen környezetünket és saját testünk működését, akkor nem kell indokolatlanul aggódnunk a még apróbb elemi részecskék jelenségei miatt. Ám az atom szinte teljes egészében üres térből áll, alkotórészeit az elektromágneses erők fotonok kicserélődése útján tartják össze. A pozitív elektromos töltést hordozó atommag jellemző átmérője 10^{-11} méter, míg maga az atom százezerszer nagyobb, 10^{-6} m átmérőjű. Ha az atommag átmérője 1 cm lenne, akkor a mag és a legkülső elektronhéj közötti távolság nem kevesebb, mint 1 kilométer lenne. Az atom külső arca, vagyis a más atomokkal való kölcsönhatását meghatározó része szintiszta elektromosság - elektronok, amelyeket a kvantumelektrodinamika szabályai szerint elektromágneses erők (fotonok kicserélődései) tartanak a helyükön.

A számítógép, amelyiken ezeket a szavakat leírom, számomra szilárd testnek tűnik. Valójában azonban ez a szerkezet is elektromágneses erők hálózata, amely néhány apró, egymástól távol lévő kvantummechanikai képződményt tart össze - az egész nem más, mint egymással kölcsönható fotonok rendszere. De vajon mire gondolok, amikor azt mondom, hogy a számítógépet szilárd testnek „érezem”, vagy folytonos képződménynek „látom”?

Amikor bármit érzékelek - például megnyomom a számítógép egyik billentyűjét, ami visszahat az ujjamra -, akkor tulajdonképpen az érzékelt tárgyat alkotó atomok elektronfelhői és az ujjam hegye atomjainak elektronfelhői közötti kölcsönhatást érzékelem. Ezek fotonok közvetítésével végbemenő elektromágneses kölcsönhatások. Amikor ránézünk a tárgyakra, akkor nyilvánvalóan azokat is fotonok és a szemünk belsejében található atomok (pontosabban az atomok külső burkát alkotó elektronok) közötti kölcsönhatások eredményeképpen látjuk. Amikor valamit megtapintunk vagy látunk (vagy hallunk, érezzük az illatát, az ízét), akkor érzékszerveink az erről szóló üzenetet az idegek hálózatán át elektromos impulzusok segítségével továbbítják az agyba. Amint láttuk, ezek az idegi impulzusok keresztüljutnak a szinapszisoknak nevezett réseken, amihez kémiai reakciókat váltanak ki. Maguk a kémiai reakciók azonban

egyszerű, az atomok külső burkát alkotó elektronok körében lejátszódó folyamatok. Ezeket a folyamatokat az elektromágnesség kvantumtörvényei irányítják. Magának az agynak a pontos működése is ugyanezek a kémiai jelenségeken alapul - vagyis fotonok cseréjén.

Az emberi érzékszervek még az e korlátok szabta határokon belül sem alkalmasak az atom belsejében lejátszódó kvantummechanikai történések megfigyelésére. A részecskék közvetlenül nem láthatók, nem ízlelhetők, nem szagolhatók vagy érinthetők. Kölcsönhatásaikat csak bonyolult vagy kevésbé bonyolult eszközeinkkel tudjuk megfigyelni, tulajdonságaikra csak a műszereink skálájáról leolvasott adatokból, vagy a fényképfelvételen rögzített nyomukból vagy a számítógépünk által meghatározott számokból tudunk következtetni. Még amikor azt mondjuk, hogy „látni” lehet a mágneses térrel csapdába ejtett atomokat, akkor ezen tulajdonképpen azt értjük, hogy megfelelő helyről érkező, megfelelő színű fényt látunk, amit egy atomnak nevezett képződmény jelenlétével tudunk értelmezni. Az atom szerkezetére számtalan kísérlet és megfigyelés eredményéből következtetünk, amihez ilyen vagy olyan, lényegében az érzékszerveink segédeszközeinek tekinthető műszert használunk. Az a képződmény, amelyet atomnak nevezünk, lényegében nem más, mint a valóságról alkotott elméleti modell. Mindazok az összetevők, amelyekről mint az atom alkotórészeiről beszéltem - a pozitív töltésű atommag, az elektronfelhő, a kicserélődő fotonok - mindannyian egy ellentmondásmentes történet szereplői, amely történet nemcsak a múltbeli megfigyeléseinkre ad magyarázatot, hanem lehetővé teszi a jövőben elvégzendő kísérleteink eredményének megjóslását is. Ám az arra vonatkozó képünk, hogy „mi is valójában” az atom, az elmúlt évszázadok folyamán sokszor megváltozott, sőt a különböző összefüggésekben még ma is különféle képeket (különböző modelleket) használhatunk.

Az „atom” szó az ókori görögök elképzeléséből származik, amely szerint ezek az anyag végső, tovább oszthatatlan részei. Ám a XIX. század végére bebizonyosodott, hogy az atomok nem oszthatatlanok, hiszen apróbb darabok (elektronok) lökhetők ki belőlük. Később olyan modellt dolgoztak ki, amely szerint az atom középpontjában helyezkedik el az atommag, amely körül pontosan úgy keringenek az elektronok, mint a bolygók a Nap körül. Ez a modell még ma is kifogástalanul működik, ha azt akarjuk megmagyarázni, hogyan „ugranak át” az elektronok az egyik pályáról a másikra, miközben elektromágneses sugárzást bocsátanak ki, vagy nyelnek el, így létrehozva az adott fajta atomra (kémiai elemre) jellemző, a színeképet alkotó vonalakat. Később azonban az elektron hullámként vagy valószínűségi felhőként történő leírása vált elfogadottabbá (mert ezzel a képpel magyarázatot lehetett adni az atom egyébként titokzatos tulajdonságaira), ezért a kvantumfizikusok ma már túlhaladottnak tekintik az elektronpályákkal dolgozó atommodellt. Ez azonban nem jelenti szükségszerűen azt, hogy az atomokat „valóban” az elektronok valószínűségi felhője veszi körül, mint ahogy azt sem, hogy az összes többi modell helytelen.

Amikor a fizikusokat egy gáz hétköznapi értelemben vett, tisztán fizikai viselkedése érdekli - például az, hogy mekkora nyomást fejt ki a tartály falára -, akkor tökéletesen megfelel számukra, ha a gázt kicsiny „biliárdgolyókból” állónak

tekintik. Amikor a vegyészek meg akarják határozni valamely anyag összetételét, és ehhez egy keveset elégetnek belőle, majd a keletkező színek vonalait elemzik, akkor tökéletesen elégedettek az atommag körül keringő elektronok „Naprendszer-modelljével”. Mindamellett Nick Herbert, aki mindenkinél okosabb akar lenni, Quantum Reality című könyvében elveti ezt a modellt:

Ha a fiam megkérdezi tőlem, miből van a világ, meggyőződéssel felelem neki, hogy valahol az anyag legmélyén atomokból. Ha viszont tovább faggat, és arra kíváncsi, milyenek az atomok, akkor nem tudok válaszolni neki, jóllehet fél életemet ennek a kérdésnek a vizsgálatával töltöttem. Milyen megalázó érzés, amikor az atomi valóság „szakértőjeként” az atom népszerű, Naprendszerre hasonlító képét vázolom fel az iskolás gyerekeknek. Azt a képet, amelyikről már nagyapáik korában is tudták, hogy hazugság.⁷⁶

De hát tényleg hazugság volt ez a modell? Most is hazugság? Nem! Semmivel sem inkább (vagy kevésbé), mint az atomi valóság bármely más modellje. Herbert túlságosan szigorú, nemcsak magával, hanem a nagyszülőkkel és általában a fizikusokkal szemben. Saját korlátain belül a bolygórendszer-modell mind a mai napig kifogástalanul működik, mint ahogy a biliárdgolyó-modell is csak saját korlátain belül érvényes. Minden atommodell hazugság, legalábbis abban az értelemben, hogy egyik sem tudja az egyetlen igazságot leírni az atomokkal kapcsolatban. Mindamellett, az összes modell igaz és hasznos, legalábbis annyira, amennyire kezelhetővé teszik számunkra az atomi világot.

A lényeg nem az, hogy nem tudjuk, mi is „valójában” egy atom, hanem az, hogy ezt még csak soha nem is tudhatjuk meg. Csak azt tudhatjuk, milyen az atom. Ha különböző eljárásokkal vizsgálat tárgyává tesszük, akkor megállapíthatjuk, hogy bizonyos körülmények közt olyan, mint egy „biliárdgolyó”. Ha más módszerrel vizsgáljuk meg, akkor arra jövünk rá, hogy inkább a Naprendszerre hasonlít. Tegyük fel egy harmadik kérdéssorozatot, és a válaszokból az derül ki, hogy olyan, mintha a pozitív töltésű atommagot elkenődött elektronfelhő venné körül. Ezeket a képeket a hétköznapi világunkból kölcsönözzük, azért, hogy segítségükkel leírassuk, mi az atom. Felépítünk egy modellt vagy megrajzolunk egy képet, de azután gyakorta elfelejtjük, mit is csináltunk, és összetévesztjük a képet a valósággal. Amikor tehát egy bizonyos modellünkről kiderül, hogy nem működik az elképzelhető összes körülmény közt, akkor még egy olyan tekintélyes fizikus, mint Nick Herbert is beleesik a csapdába és „hazugságot” kiált.

A fizikusok hétköznapi tapasztalataik alapján alkotják meg a kvantumvilág modelljeit. Ilyenkor csak annyit mondhatunk, hogy az atomok és az elemi részecskék „hasonlítanak” egy bizonyos, már ismert dologra. Nincs értelme az atomot biliárdgolyóhoz hasonlítani, ha olyasvalakivel beszélgetünk, aki még életében sohasem látott biliárdgolyót, mint ahogy fölösleges az elektronpályákat a bolygópályákhoz hasonlítani, ha valaki nem tudja, hogyan működik a Naprendszer.

76 Herbert: Quantum Reality, 197. oldal.

Az analógiák és a modellek akár tökéletes, zárt kört is alkothatnak. Ez történik például akkor is, amikor meg akarjuk magyarázni, milyen kölcsönhatások lépnek fel az atomok között mondjuk egy kristályrácsban. A kristályban az elektromágneses erők tartják az atomokat a meghatározott geometriai rend által előírt helyükön. Ha az egyik atomot kimozdítanánk a helyéről, akkor a szomszédai által rá gyakorolt elektromágneses kölcsönhatás visszarángatná a helyére. Hasznos analógiának bizonyulhat, ha úgy képzeljük el a helyzetet, mintha az egyes atomokat parányi rugócskák kapcsolnák össze szomszédáikkal. Ha az egyik atomot elmozdítjuk a helyéről, akkor az elektromágneses erők úgy hatnak, mint az odaképzelt rugók, amelyek az atom egyik oldalán megnyúlnak, és ezért húzóerőt fejtenek ki az elmozdult atomra, míg a másik oldalon összenyomódnak és ezért vissza akarják tolni az atomot a helyére. Úgy tűnik, valóban jól használható modellt sikerült találnunk, amelyik az adott körülmények közt rugók működéséhez hasonlítja az elektromágneses erőket.

De mi is valójában a rugó? A hétköznapi életből is jól ismert, legközönségesebb formájában egy csavarvonalban vagy spirálisan meghajlított fémdarab. Csavarvonalban feltekert formájában a rugó a klasszikus óraművek lelke, márpedig egykor a fizikusok valóban óraműhöz hasonlították a világ működését, ami még vonzóbbá teszi az analógiát. Egyszerű spirálrugót találhatunk például a golyóstollunk belsejében, ha ezt a rugót összenyomjuk, szét akarja lökni az ujjainkat, ha viszont széjjelhúzzuk, akkor össze akar húzódni. De vajon miért? Nos, azért, mert a rugó atomokból áll, amelyeket elektromágneses erők tartanak össze. Az erők, amelyeket a rugó összenyomásakor vagy széthúzásakor érzünk valóban elektromágneses erők. Amikor tehát azt mondjuk, hogy a kristályt alkotó atomok közötti erők olyanok, mint a parányi rugók, akkor ezzel tulajdonképpen semmivel sem állítottunk többet, mint azt, hogy az elektromágneses erők olyanok, mint az elektromágneses erők.

Az atom fogalma olyan közismert, mint az előző példánkból is láthattuk, hogy nagyon nehéz megfigyelni a modellalkotás folyamatát, amikor az atomokról van szó. Sokkal világosabban láthatjuk a fizikusok modellalkotási folyamatát a szubatomi világ esetében, ahol sok esetben az analógiákat nem egyszerűen a hétköznapi életből veszik, hanem másodkézből, abból, amilyenek a valóságot hétköznapi fogalmainkkal megértjük. Az atommagban (amely az atom egyszerű leírása szempontjából pozitív töltésű biliárdgolyónak tekinthető) elemi részecskéket találunk, amelyek bizonyos értelemben „olyanok, mint” az elektronok, továbbá erőkkel találkozunk, amelyek „úgy működnek, mint” az elektromágnesség. De magukat az elektronokat és az elektromágnességet is csak a hétköznapi életből ismert dolgokhoz - biliárdgolyóhoz, a tó felszínén látható hullámokhoz vagy bármi máshoz - hasonlítva tudjuk leírni. A valóság olyan, amilyené mi magunk tesszük - legalábbis ha a modelljeink megmagyarázzák a megfigyelések eredményét, akkor jó modelleknek tekinthetők. De vajon tényleg igaz az, hogy az elektronok vagy a protonok ott gubbasztanak az atom belsejében, és arra várnak, hogy felfedezzük őket, és a protonok belsejében már akkor is ott voltak a felfedezésükre váró kvarkok, amikor a tudósok még nem voltak elegendően éleselműek ahhoz, hogy „felfedezzék” őket? Vagy sokkal valószínűbb, hogy a kvantumvilág szintjén létező valóság bizonyos, lényegében

ésszel felfoghatatlan vonatkozásait begyömöszöljük valamilyen „proton” vagy „kvark” névvel felcímkézett dobozokba, így téve emberi használatra alkalmassá őket?

Megalkotjuk a kvarkokat

Ezt a kérdést tette fel az Edinburgh-i Egyetemen tanító Andrew Pickering nagyszerű, *Constructing Quarks* című könyvében. „Azt a felfogást valljuk”, írja könyve előszavában, „hogy a kvarkok valóságossága a részecskefizikusok tevékenységének a következménye, és nem fordítva”. Ez magyarázza könyve címének megválasztását is, amelyet magam is kölcsönvettem érvelése összefoglalásához.

A valóság standard modellje, amelyet a legtöbb fizikus elfogad, a hétköznapi világot lényegében négyféle részecskéből és négy kölcsönhatásból építi fel. A teljes kép kicsit bonyolultabb, mert a részecskék megkettőződni látszanak (de az erők nem), aminek következtében a részecskék három „generációja” áll elő. Ezek tulajdonságai nagyon hasonlóak egymáséhoz, tömegük azonban jelentősen különböző. Ami a közönséges atomokat illeti, a négy „első generációs” részecske mindennek a magyarázatához elegendő. Maga az elektron a négy „fundamentális” részecske egyike, de az elektronhoz kapcsolódva megjelenik a neutrínónak nevezett részecske is. Az elektront és a neutrínót együtt „leptonoknak” nevezzük. A protonok és a neutronok az atommag „belsejében” található részecskék, ezeket azonban nem tekintjük igazán alapvetőknek. Úgy látjuk, mintha ezek kvarkokból épülnének fel. A kvarkokat viszont alapvetőknek tekintjük, amelyek az első generációban (a két első generációs leptonnak megfelelően) két változatban jelennek meg, ezek a „fel” és a „le” megnevezést kapták. A neveknek nincs jelentőségük, egyszerűen csak a fizikusok által rájuk aggatott címkék, a kvarkok két fajtáját akár mondjuk „Alice” és „Bob” névvel is illethetnénk.

A standard modell szerint a proton két fel- és egy le-kvarkból épül fel, amelyeket a négy alapvető kölcsönhatás egyike tart össze. A neutron viszont két le- és egy fel-kvarkból áll, az összetartó kölcsönhatás pedig ugyanaz, mint a protonnál. Minthogy minden fel-kvark (egyéb tulajdonságai mellett) az elektron töltésének kétharmadával egyező nagyságú, de pozitív töltést hordoz, míg a le-kvark töltése negatív, és nagysága egyharmada az elektron töltésének, ezért végső soron a proton egységnyi pozitív töltést hordoz ($\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$), míg a neutronnak összességében nincs töltése ($\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = +0$), vagyis elektromosan semleges.

A kvarkokat protonokká és neutronokká, valamint a protonokat és neutronokat atommaggá összetartó erős kölcsönhatás mellett létezik egy gyengébb erő is (amelyet meglehetősen logikusan gyenge kölcsönhatásnak nevezünk), ez felelős a radioaktivitásért. A másik két alapvető kölcsönhatás az elektromágnesség és a gravitáció. A kvarkok „olyanok, mint” az elektronok, az erős kölcsönhatás pedig „olyan, mint” az elektromágnesség. Az erős kölcsönhatás a bozonoknak nevezett

részecskék kicserélődése révén működik, ezek a részecskék „olyanok, mint” a fotonok. A kép sok szempontból egyszerű és szimpatikus, amely természetesen nagyon termékenynek bizonyul, amikor előrejelzéseket akarunk készíteni, és amelyet számtalan kísérlettel sikerült alátámasztani. A modellt bizonyára még Newton is elfogadta volna. De vajon hogyan alkották meg a fizikusok a szubatomi világnak ezt a modelljét?

Az egyik körülmény, amelyet Pickering hangsúlyoz, hogy nem létezik tökéletes elmélet. Valójában, elvben tetszés szerinti számban álmodhatunk meg különféle elméleteket, amelyek mindegyike megfelelő magyarázatot ad a kísérleti tények egy meghatározott csoportjára. Az egyik módszer, amellyel a fizikusok megpróbálják kirostálni a rossz elméletek közül a jókat, a következő. Azokat részesítik előnyben, amelyek a legkevesebb alapfeltevésből kiindulva a legtöbb tényre képesek magyarázatot adni - ám, mint a negyedik fejezetben láttuk, ettől még bizonyos esetekben megmaradhat a magyarázatok közötti választás lehetősége. Egyes elméleteket egyszerűen kevésbé elfogadhatónak tartanak, mint másokat, és ezért zárják ki. Ám az elfogadhatóságra történő bárminemű hivatkozás magában foglal valamilyen ítéletet - márpedig éppen a kvantummechanika különböző értelmezéseinek példája mutat rá arra, hogy még a természettudományos ítéletek is milyen személyesek és tévedésekkel terheltek lehetnek. A legkritikusabb tényező mégis az, hogy a természettudományok eddigi történetében egyetlen olyan elmélettel sem találkozhatunk, amelyik minden tény magyarázatára alkalmas lenne. Sok fizikus állítja, hogy ők éppen egy ilyen elmélet felállításán fáradoznak - ez lenne az úgynevezett „mindenség elmélete” (Theory of Everything). Ha azonban okulhatunk a történelem tapasztalataiból, akkor arra kell számítanunk, hogy erőfeszítéseik eleve kudarcra vannak ítélve. Mindig vannak olyan pontok, ahol az elmélet és a kísérletek eredménye között ellentmondást találunk, annak eldöntése pedig ismét valamilyen szubjektív választáson múlik, hogy az eltérések közül melyiket tartjuk még elfogadhatónak, és melyiket tekintjük olyan súlyosnak, hogy az az egész elmélet összeomlásához vezet.

Persze az elmélet és a kísérlet között azért is előfordulhat ellentmondás, mert maga a kísérlet sem tévedhetetlen. A kísérlet eredményének értelmezése (különösen egy, a proton belső szerkezetének felderítését célzó kísérlet esetén) jelentős mértékben a kísérlet működésének elméleti megalapozottságán és megértésén múlik, eszerint tehát bármilyen elméleti hiányosság a kísérlet hiányosságaként fog megmutatkozni (vagy legalábbis a kísérlet megértésének hiányosságaként). Ilyenkor a fizikusoknak ismét el kell dönteniük, mi az, amit tulajdonképpen megmérnek. Amint arra Pickering rámutat, egy olyan tudományterületen, mint a részecskefizika, állandó problémát jelent a „háttérzaj”. Más, a megfigyelni kívánthoz hasonló jelenségek is lejátszódnak, amelyeket azonban ki kell szűrni, ha ez egyáltalán lehetséges. Olyan ez, mint amikor a rádiókészülékünkkel ki akarjuk szűrni a háttérzajt (a különféle „fütyöket”), ezért megpróbáljuk a vevőt a lehető legpontosabban a hallgatni kívánt jel hullámhosszára hangolni - valójában a fizikusok is a vizsgálni kívánt tulajdonságot „jelnek”, a zavaró hatásokat pedig „zajnak” nevezik. Természetesen lehetetlen minden zajt eltüntetni, ezért ismét szubjektív ítéletet kell hoznunk annak

eldöntésére, hogy a kísérlet mikor lesz „elegendően jó” a kívánt cél elérésére, és attól kezdve a megmaradó zajt el kell hanyagolnunk.

A siker azonban sikert terem. Ha egy elmélet jónak bizonyul (vagy legalábbis elfogadjuk) a dolgok működésének leírására, akkor kiszorítja maga mellől a rivális elméleteket, amelyekre attól kezdve senki sem figyel. Ez történt például a fényelméletek esetén is. Newton után egy évszázadon keresztül a részecskeelmélet uralkodott, majd Young és Fresnel, később pedig Maxwell munkássága nyomán a hullámelmélet kiszorította a részecskeelméletet. Ma viszont már tudjuk, hogy mindkét modell helyes. A kvarkelmélet még nem olyan bonyolult, mint a fény részecske-hullám elmélete. „Ha a kvarkokat és társaikat valóságosan létező képződményekként értelmezzük”, mondja Pickering, „akkor a kvarkmodellek közötti választást ... problémamentessé tettük: ha valóban a kvarkok a világ legalapvetőbb építőkövei, akkor mi értelme lenne alternatív elméleteket keresgélni?” - noha könnyen előfordulhatna, hogy az alternatív elméletek is magyarázatot tudnak adni az összes kísérleti eredményre.⁷⁷ Sok fizikus került már súlyos helyzetbe azért, mert megfeledezett arról, hogy a standard modell is csupán egy modell. A protonok úgy viselkednek, mintha három kvarkból állnának; ez azonban nem „bizonyítja”, hogy a kvarkok „valóságos létezők”. Mindezt William Poundstone így fogalmazza meg 1988-ban megjelent, *Labyrinths of Reason* című könyvében:

„A tudósoknak óvatosaknak kell lenniük a tervezhetetlen fogalmakkal. A kvarkok hipotetikus képződmények, amelyek állítólag a protonok, a neutronok és más elemi részecskék belsejében lakoznak. A kvarkok azonban nem valóságosak: nem elég, hogy még soha senki nem figyelt meg egy izolált kvarkot, ráadásul (a legtöbb elmélet szerint) az izolált kvark még csak nem is létezhet. Kvark az, amivé a proton széthasadna, ha felbontható lenne, márpedig nem az... egyesek azon csodálkoznak, hogy ha (a kvarkok feltételezett tulajdonságai) csak az egyszerű valóság mesterséges elbonyolításai, akkor miért nem értjük őket mégsem. Talán egy szép napon valaki majd rájön, mik is ezek valójában, és akkor megértjük, hogy a jelenlegi fizikánk a valóság leírásának mesterkéltnél módja ... A választ nem az égből kell keresnünk, hanem a saját fejünkben.”

Poundstone azonban csak félúton jár annak megértésében, miről is szól a fizika. Az elmondottakat nem kapcsolja össze azzal a ténnyel, hogy a protonok, a neutronok és a többi elemi részecske ugyancsak hipotetikus képződmény, amelyet a fejünkből a modelljeink segítségével vetítünk bele a valóságba. Nos, létezhet egy egyszerűbb modell is, amelyik a ma hagyományosan a kvarkmodellel magyarázott jelenségek szintjén működik; de ez sem azt mondaná meg, miként működnek a dolgok „valójában”, hanem ez is csak egy modell lenne. Éppúgy, ahogy Maxwell hullámegyenlete és Einstein fotonjai egyaránt a valóság jó modelljei a fény jelenségének a magyarázatára, mint ahogy az atom „biliárdgolyó”-modellje és Naprendszer-modellje ugyancsak jó modellek, attól függően, milyen problémát szeretnénk megoldani.

Amint kifejtettem, az egész fizika alapja az analógiák és modellek felállításán alapul, ezek hivatottak számot adni annak a világnak az eseményeiről, amelyet képtelenek vagyunk érzékszerveinkkel közvetlenül észlelni. Az elemi részecskék standard modelljének kidolgozásában az 1960-as és 1970-es években elért hatalmas előrehaladás két kulcsfontosságú analógiának köszönhető. Az egyik az atommagot protonokból és neutronokból állónak tekintő modell, és ennek folytatásképpen a protonokat és a neutronokat kvarkokból állónak feltételező modell. A másik az elektromágneses erőt fotonok kicserélődésével magyarázó modell, amelyből eljutottunk a kvarkok közötti kölcsönhatások fotonszerű részecskék kicserélődésével történő magyarázatáig. A kvantumelektrodinamikával (QED) vont párhuzam olyan pontos és megalapozott, hogy ennek az erős (vagy „színes”) kölcsönhatásnak a standard elméletét kvantumszíndinamikának (quantum chromodynamics, QCD) nevezték el - „szín”, azért, mert a szereplő részecskék közül soknak különböző színek nevét adták, éppoly önkényesen, ahogy a kvarkok két típusát fel- és le-kvarknak nevezzük. A névadás természetesen nem jelenti azt, hogy a szóban forgó részecskék a szó hétköznapi értelmében „valóban” színesek lennének.

A kvarkelméletet azonban nem fontolgatták, az rögtön teljes értékű elméletté vált, minden ellenkezést egyetlen csapással félresöpört. Lassanként belopódzott a fizikusok tudatába, sokszor legjobb meggyőződésük ellenére. Az ötlettel két fizikus állt elő, nagyjából egy időben és egymástól függetlenül, az 1960-as évek elején. A kvarkelmélet egyik szülőatyja Murray Gell-Mann amerikai fizikus volt (aki 1929-ben New Yorkban született). Tőle származik az elnevezés is, amit James Joyce Finnegan ébredése című művének egyik sorából kölcsönzött. Gell-Mann a Kaliforniai Műszaki Egyetemen dolgozott, és már korábban is nagy elismertségre tett szert, környezete legjelentősebb elméleti fizikusának tartották. Részt vett azokban a sikeres próbálkozásokban, amelyek során a fizikusok megpróbálták tulajdonságaik alapján csoportokba rendezni az ismert elemi részecskéket, és ennek alapján előrejelzéseket készíteni a még felfedezésre váró részecskék tulajdonságaira. Hasonlóan ahhoz, ahogyan Dmitrij Mengyelejev a XIX. században a kémiai elemeket a periódusos rendszerbe rendezte, és annak alapján megjósolta a még fel nem fedezett kémiai elemek tulajdonságait - ami ugyancsak kitűnő példa az analógia erejére és a tudomány hagyománytisztelő természetére.

Ez a rendszerezésre törekvés vezetett arra a felismerésre is, amely szerint a proton és a neutron sok tulajdonsága megmagyarázható a (ma már kvarkoknak nevezett) fundamentális tripletok különböző módon történő elrendeződésével. Gell-Mann csaknem szégyenkezve publikálta 1964-ben erre vonatkozó elképzelését, egy, a Physics Letters-ben megjelent, mindössze kétoldalas cikkben. Részben azért habozott ötletét közreadni - és ezért vonakodtak a fizikusok éveken keresztül attól, hogy komolyan vegyék az elképzelést -, mert az elgondolás szerint a triplet részecskék elektromos töltésének az elektron töltése törtrészával kellett egyenlőnek lennie, márpedig az elektron töltését mindenki elfogadta az elektromos töltés „lehetséges legkisebb” egységeként. Ma már senkit sem zavar különösebben, hogy a kvark elektromos töltése az elektronénak egyharmada vagy kétharmada, ám 1964-ben még „mindenki tudta”, hogy ez lehetetlen. Ezért Gell-Mann a cikkében csaknem letagadta saját ötletét. Kifejtette, hogy a proton és a

neutron tulajdonságait oly szépen magmagyarázó tripletok valójában csupán matematikai segédeszköznek tekinthetők, amely csak arra jó, hogy kezelni tudjuk a protonok és a neutronok bizonyos tulajdonságait. Véleményét így foglalta össze:⁷⁸

Vicces elgondolkodni azon, hogyan viselkednének a kvarkok, ha fizikailag létező, véges tömegű részecskék lennének (nem pedig a végtelen tömeg határán lévő, tiszta matematikai képződmények) ... A $-1/3$ vagy $+2/3$ töltésű stabil kvarkok és/vagy a $-2/3$ vagy $+1/3$ vagy $+4/3$ töltésű stabil dikvarkok keresése a legnagyobb részecskegyorsítókban segítené megnyugtatni magunkat afelől, hogy a valóságban tényleg nem léteznek a kvarkok.

Még a kvarkokat „feltaláló” elméleti fizikus is azzal szeretné megnyugtatni magát, hogy a kvarkok csupán a képzelet szüleményei, a valóságban nem léteznek! Ez nem is olyan fura, ahogyan első pillanatban hangzik. Gell-Mann alapvetően matematikai és még inkább ezoterikus oldalról közelítette meg a problémát, amikor „felfedezte” a kvarkokat. Megállapította, hogy az egyenletek bizonyos tulajdonságai úgy magyarázhatók meg, ha a protonokat és a neutronokat tripletokból állónak tételeznénk fel, ám a kérdést matematikai oldalról tárgyalta, nem gondolt arra, hogy ezeket a tripletokat valóságos fizikai részecskéknek tekintse.

A kvarkokat felfedező másik elméleti fizikusnak valamivel kevésbé voltak kételyei felfedezését illetően, ám úgy látta, hogy az ötlet támogatása nem kedvezne további karrierjének. George Zweig 1937-ben Moszkvában született, de kivándorolt az Egyesült Államokba, ahol 1959-ben a Michigan Egyetemen szerzett diplomát, majd a Kaliforniai Műszaki Egyetemen (CalTech) kezdett kutatni. Kísérleti fizikusként kezdte a pályáját, de három sikertelen év elteltével átnyergelt az elméleti kutatásra, doktori értekezését Richard Feynman irányításával készítette. Gell-Mannhoz hasonlóan ő is felismerte, hogy a részecskék, például a protonok és a neutronok tulajdonságai úgy magyarázhatók meg, ha más részecskékből álló, általa „ászoknak” nevezett tripletokból állnak. De talán azért, mert még viszonylag fiatal volt, ráadásul kezdő a részecskefizikai játszmában (így kevésbé kötötték a hagyományok), sokkal inkább hajlott arra, hogy ne óvatoskodjék, hanem fogadja el ezeket a képződményeket fizikai létezőknek.

Zweig 1963-ban a CERN-be, a Genf melletti európai részecskefizikai központba ment, ahol befejezte doktori értekezését és megírta publikációját a felfedezéséről. A „felfedezését” közreadó dolgozat ugyancsak 1964-ben jelent meg, és ebben a cikkben Zweig arra a következtetésre jutott, hogy „figyelembe véve a rendkívül kezdetleges módszert, amellyel a problémát megközelítettük, a kapott eredmények valamiképpen rendkívülinek tűnnek.”⁷⁹

A fizikustársadalom legnagyobb része egyetérteni látszott, ezért Zweig sem elismerést kapott meglátásáért, hanem kis híján különcnek minősítették, és

78 Physics Letters 8 (1964), 214. oldal.

79 CERN Preprint, 8182/TH401 sz.

nevetség tárgyává tették. Erre 1980-ban egy nemzetközi konferencián így emlékezett:

Az elméleti fizikusok közösségének a reakciója az ász modell hallatán általában nem volt kifejezetten jóindulatú. Olyan nehéz volt elérni, hogy a CERN-jelentés az általam kívánt formában jelenjen meg, hogy a végén feladtam a próbálkozást. Amikor az egyik vezető egyetem fizikai intézete egy állást akart felajánlani nekem, akkor az egyetem vezető elméleti fizikusa, az egész elméleti fizika egyik legtekintélyesebb alakja megakadályozta, hogy megkapjam az állást. A kari értekezleten szenvedélyesen érvelt amellett, hogy az ász modell egy „sarlatán” műve.⁸⁰

Mindez annak ellenére történt, hogy Gell-Mann-nal ellentétben a CERN preprint eredeti, 24 oldalra rugó terjedelmű kéziratában Zweig pontosan és részletesen megjelölte a triplet elképzelés következményeit.

Az igazságtalanságok sora azonban ezzel még nem ért véget. Gell-Mann 1969-ben az elemi részecskék és kölcsönhatásaik osztályozása területén végzett munkásságáért és elért eredményeiért megkapta a fizikai Nobel-díjat. Kétségtelenül megérdemelte a kitüntetést, de 1969-re a kvarkelmélet még nem volt teljesen elfogadott, ezért a díj odaítélésének indokolása említést sem tesz az e területen végzett munkájáról. Amikorra viszont a kvarkelmélet a standard modell elfogadott részévé vált, akkor nem lett volna illő még egyszer Gell-Mann-nak adni a díjat. Ám, feltételezhetően a Nobel-díj bizottság nyilván úgy érezte, hogy nem adhatják oda Zweignek az elismerést anélkül, hogy Gell-Mann ne kapná meg ugyanazért az eredményéért. Az anomália szembeötlő: éppen az az ember nem kapta meg soha a Nobel-díjat, aki először vetette fel, hogy a kvarkok valóságos létezők, és aki először mutatott rá részletesen az elképzelés következményeire, kijelölve az utat a fizika standard modellje felé. Persze azt soha senki nem állította, hogy a Nobel-díjat mindig igazságosan és kizárólag észérvek alapján ítélik oda.

A kvarkelméletet csak akkor kezdték komolyan venni, amikor a kísérletek, köztük a részecskék ütköztetésével végzettek (az elektronok visszapattannak a protonokról, a protonok pedig egymásról) elkezdtek feltárni a proton belső szerkezetét. Ez azonban egyáltalán nem olyan egyszerű, amilyennek első pillanatban látszik, mert a proton sokkal bonyolultabb szerkezetű, mint az elektron, akár kvarkokból áll, akár nem (a most következő okfejtés a neutron belső szerkezetére is igaz, de a kísérleteket protonokkal végezték, mert azok elektromos töltése olyan kapaszkodót jelentett, amelynek köszönhetően mágneses térrel irányítani lehetett őket, és nagy energiákra fel lehetett gyorsítani).

Emlékezzünk vissza arra, milyennek tekintettük az elektront a kvantumelektrodinamikában: „virtuális” fotonok, elektron-pozitron párok és más

80 Megjelent a Baryon '80 c. kötetben, szerk.: N. Isgur (Torontói Egyetem Kiadója, Toronto, 1981), 439. oldal.

ehhez hasonló felhőjével körülvelt pontnak. Az elektron mágneses momentumát hihetetlen pontossággal tudtuk kiszámítani, figyelembe véve az egyre bonyolultabb („magasabb rendű”) kölcsönhatásokat, azonban minden egyes, a nagyobb bonyolultság irányába tett lépés csak egyre kisebb mértékben fokozta a pontosságot. Minthogy a proton pozitív töltést hordoz, ezért szintén részt vesz az ehhez hasonló elektromágneses kölcsönhatásokban, és a protonnak is van mágneses momentuma, amelyet ugyanúgy lehet kiszámítani, mint az elektronét. Az elektronnal ellentétben azonban a proton az erős kölcsönhatást is »érzi”. Amikor az elméleti fizikusok még nem jöttek rá, hogy a kvarkok közötti kölcsönhatásban is az erős kölcsönhatás jut szóhoz, azzal már akkor is tisztában voltak, hogy ez tartja össze az atommagban a protonokat és a neutronokat, sőt bizonyos tulajdonságait is meg tudták mérni. A kvantumelektrodinamikai okfejtés analógiájára megállapították, hogy a protont más részecskék felhőjének kell körülvennie, többek között proton-antiproton pároknak, neutron-antineutron pároknak és a kölcsönhatást közvetítő, mezonoknak nevezett részecskéknek (a fotonok erős kölcsönhatásban szereplő megfelelői). Van azonban egy döntő jelentőségű különbség. Az erős kölcsönhatás esetében ezek a járulékos hatások nem válnak egyre kisebbé, ahogy egyre bonyolultabb helyzeteket veszünk figyelembe - vagyis a magasabb rendben végzett számítások esetében. Ahelyett, hogy a magasabb rendű tagok csak egyre kisebb korrekciókat jelentenének, ugyanolyan fontosak, mint maguk a „valóságos” protonok. Ennek következtében a kvantumtérelmélet szerint a protont egymással kölcsönható, virtuális részecskék bonyolult halmazának kell tekinteni, amely sokaság átmérője még az erős kölcsönhatás hatótávolságán is túlnyúlik - bár ez utóbbi szerencsére csak mintegy 10^{-13} cm.

A proton belső szerkezetének felderítését célzó kísérletek sikere azon múlik, rendelkezünk-e az elektron fizikáját leíró jó elmélettel, vagyis magával a kvantumelektrodinamikával. Az elméletiek szilárd meggyőződéssel vallották, hogy pontosan értik az elektront, és az elektronok valóban pontszerű objektumokként voltak kezelhetők. Csakis ennek köszönhető, hogy a protonokon szóródó elektronokkal végzett kísérletek eredményeit értelmezni tudták, és ezen keresztül feltárták magának a protonnak a belső szerkezetét. Amikor a gyorsítóknak végzett kísérletekben a nagy energiájú (azaz gyorsan mozgó) elektronok egymásról visszapattannak, általában nagyon nagy szögben verődnek vissza, mintha a biliárdgolyókhoz hasonló, kemény objektumok lennének. Amikor azonban az elektronok protonokról verődnek vissza, általában csak kis szöggel térülnek el, mintha egy puha test szórná őket, amely csak szelíd, eltérítő lökést képes adni nekik. A kétféle kölcsönhatást „kemény” és „lágy” szórási kísérletnek nevezik. Ezek a kísérletek azt bizonyították, hogy a proton átmérője valóban mintegy 10^{-13} cm, ami jelentős lökést adott a térelméletet művelő elméletieknek. Ám a Természetnek a kísérletezők által feltett kérdésekre adott „válaszai” attól függték, milyen kísérletet végeztek el, és mit akartak megmérni. A filozófus Martin Heidegger így összegezte a helyzetet:

Bár a modern fizika kísérleti eszközöket használ a természet faggatására, ennek ellenére mégsem tekinthető kísérleti fizikának. Ennek éppen a fordítottja igaz. Az immár tisztán elméletté vált fizika arra kéri a természetet, hogy előre

kiszámítható erők formájában nyilatkozzék meg. Ezáltal pontosan azzal az egyetlen céllal állítja fel kísérleteit, hogy megkérdezze, vajon a természet követi-e a tudomány által előírt utat, és ha igen, akkor miként teszi ezt.⁸¹

Az 1960-as évek elején tehát két ember egymástól gyökeresen eltérő gondolatmenetet követve felfedezte (vagy feltalálta) a kvarkokat. Az eset furcsa visszhangjaként az évtized végén a térelmélet két kutatója hasonlóan különböző magyarázatot adott a szórási kísérletek részletes eredményeire. Az egyikük, James Bjorken a Stanford Egyetemen Gell-Mann megközelítését követve a matematikai végén fogta meg a problémát. A jelenségre adott magyarázatai helyt álltak, legalábbis matematikai értelemben, ám Pickering szerint „felfoghatatlanságukat tekintve ezoterikusnak mondhatók”.⁸² A másik megközelítés azonban Richárd Feynmantól származott, akinek az éleslátására és érthető fogalmazására egyaránt nyugodtan számíthatunk.

Feynman tárgyalásmódját illetően az a nagyszerű, hogy még olyan fizikusok számára is érthető, akik azon a hagyományon nevelkedtek, hogyha valamiről (például az atomokról) meg akarjuk tudni, miből áll, akkor szét kell szednünk. Elképzelését az 1960-as évek közepén dolgozta ki, és 1969-ben publikálta. Anélkül, hogy előre eldöntötte volna, léteznek-e a kvarkok, kidolgozott egy általános magyarázatot arra, mi történik, amikor egy nagy energiájú elektron behatol a protonba, vagy amikor két nagy energiájú proton szemtől szembe összeütközik.

Feynman a térelméletnek abból a feltevéséből indult ki, amely szerint a proton valójában részecskék raját jelenti. A szigorú analógia a kvantumelektrodinamikával azt diktálta, hogy ezen részecskék közt protonokat, neutronokat és antirészecskéket, valamint mezonokat kell találnunk. A kvarkelmélet szerint viszont ennek a részecskerajnak három alapvető kvarkból kell állnia, ám ezek mindegyikéhez saját virtuális részecskékből álló felhő kapcsolódik. A tudatosan kételkedő Feynman a proton e belső összetevőinek a „parton” nevet adta, ami mindkét lehetőséget tartalmazza. Rájött azonban, hogy ebből a bonyolultságból csak nagyon kevés tárgyasul egy-egy ütközés során. Amikor egy elektront lövünk a protonba, akkor az elektron elektront cserélhet egyetlen partonnal. Ennek hatására a parton visszalökődik, az elektron pedig eltérül, de ez jelenti a protonra gyakorolt hatásának (és a proton elektronra gyakorolt hatásának) a határát. Még ha két proton pontosan szemközt ütközik is egymással, akkor is tulajdonképpen a két proton egyes partonjai lépnek kölcsönhatásra egymással, pontszerű, kemény szórási események sorozata formájában. Bjorken számításai azt mutatták (a szakértők számára!), hogy egy meghatározott matematikai keret képes magyarázatot adni a protonok

81 Heidegger: The Question Concerning Technology (Harper and Row, New York, 1977), 21. oldal.

82 Pickering: Constructing Quarks, 132. oldal. Örülök, hogy megismerhettem Pickering véleményét a kérdésről, mert a gondolatmenetek számomra is felfoghatatlanok, azt is csak matematikus barátaimra hagyatkozva állítottam, hogy valóban helytállóak.

szóródásának mikéntjére. Ezután állítólag az is kiderül, hogy ehhez a matematikai kerethez egyikféleképpen úgy lehet eljutni, ha feltételezzük, hogy a protonok pontszerű részecskéket tartalmaznak. Feynman viszont azt állította, hogy ha a protonok pontszerű részecskéket tartalmaznak, akkor ez elvezet a szórási megfigyelések magyarázatának matematikai leírásához.

Pickering azt is megmagyarázza, miért ért el Feynman elmélete ilyen átütő sikert, és miért vezetett el azokhoz a további kísérletekhez, amelyek a legtöbb elméleti fizikus nagy meglepedésére bebizonyították a kvarkok „valóságos” létezését. Szerinte ugyanis Feynman egy régen megalapozott és világosan értett hagyományt követett. Az elméleti fizikusok klasszikus analógiáját a türelmes kivárára azok a XX. század elején végzett kísérletek jelentik, amelyekkel meg akarták ismerni az atom szerkezetét. A részecskefizika úttörője, Ernest Rutherford atomokat bombázott úgynevezett alfa-részecskékkal (amelyekről ma már tudjuk, hogy a hélium atommagjai), és megállapította, hogy egyes alfarészecskék nagy szögben szóródtak. Ebből arra következtetett, hogy az atom középpontjában valami kemény és biliárdgolyószerű dolognak kell lennie (az atommagnak). Az 1960-as években végzett kísérletek tanúsága szerint az elektronok néha ugyancsak nagy szögben szóródnak az egyébként „lágym” protonokon. Ezt Feynman modellje a proton belsejében található, kemény, biliárdgolyószerű képződményekkel magyarázta.

Évekbe telt, mire megalapozták a standard modellt, de amikor a fizikusok elkezdtek ebben az irányban gondolkodni, akkor az egész folyamat már elkerülhetetlennek látszott. Két fontos analógiára támaszkodva - az atom atommagot tartalmazó modelljére és a fény kvantumelektrodinamikájára - a protonok és a neutronok kvarkmodellje, valamint az erős kölcsönhatást leíró kvantum-színdinamika ellenállhatatlanná vált. „Az analógia nem a sok lehetőség egyike volt”, véli Pickering, „hanem ez volt a történetek alapja. Az analógia nélkül nem lenne új fizika”.⁸³

Ugyanez igaz magára a kvantummechanikára is. Valóban nehéz a kvantumfizikát másnak tekinteni, mint analógiának - a hullám-részecske kettősség a klasszikus példa, ahol arra törekszünk, hogy „megmagyarázzunk” valamit, amit nem értünk. Ehhez két, egymást kölcsönösen kizáró analógiát alkalmazunk, méghozzá ugyanarra a kvantummechanikai képződményre.

Pickering azonban még egy érdekes, és talán zavarba ejtő kérdést tesz fel. Vajon elkerülhetetlen volt-e a részecskefizikában a standard modellhez vezető út? Ez lehet a valódi (és egyetlen) igazság a világ működésére vonatkozóan? A standard modellhez elvezető elméletek egyike sem volt tökéletes, mutat rá, ezért a részecskefizikusoknak folytonosan azon kellett törni a fejüket, hogy melyik elméletet vessék el, és melyiket próbálják továbbfejleszteni, hogy jobban illeszkedjék a kísérleti eredményekhez. A továbbfejlesztésre alkalmasnak talált elméletek hatással voltak arra, hogy milyen kísérleteket végezzenek el, és a döntéseknek ez kölcsönható láncolata vezetett el végül az új fizikához. Az új fizika

83 Pickering: Constructing Quarks, 407. oldal.

annak a kultúrának a terméke volt, amelyikben megszületett.

Thomas Kuhn tudományfilozófus egészen a logikus következményéig továbbvitte ezt az érvelést. Azzal érvelt, hogy ha a tudományos ismeretek összessége valóban a kultúra terméke, akkor a különböző világokban létező tudományos közösségek (a különböző világ itt szó szerint értendő, különböző bolygókról vagy ugyanazon bolygón különböző korokban létező kultúrákról van szó) különböző természeti jelenségeket tartanak fontosnak, és ezeket a jelenségeket különböző elméleti módszerekkel (különböző analógiákkal) magyaráznák. A különböző tudományos közösségektől (különböző világokból) származó elméletek nem ellenőrizhetők egymáshoz képest, és a filozófusok szóhasználatával élve „összemérhetetlenek” lennének.

Ez ellentétben áll a fizikusok többségének saját munkájáról és tudományáról alkotott felfogásával. A fizikusok ugyanis abban hisznek, hogy ha egykor kapcsolatba tudunk majd lépni egy másik bolygó, a tudományban jártas civilizációjával, akkor - feltéve, hogy a nyelvi nehézségeket le tudjuk győzni - azt fogjuk tapasztalni, hogy az idegenek ugyanolyan képet alkotnak az atomokról, a protonok és a neutronok létezéséről vagy az elektromágneses erők működéséről, mint mi. Valójában nem egy tudományos-fantasztikus történet azt sugallja, hogy a természettudomány (a szó szoros értelmében) az egyetemes nyelv, és ha kapcsolatba akarunk lépni egy idegen civilizációval, akkor ezt például úgy tehetjük meg, hogy leírjuk az elemek kémiai tulajdonságait, vagy éppen a kvarkok természetét, és ezzel teremtjük meg a további eszmecsere alapját. Ha viszont kiderül, hogy az idegenek a miénktől alapvetően eltérő felfogást vallanak az atomok mibenlétéről, vagy egyáltalán nem is dolgoznak az atom fogalmával, akkor a beszélgetés alapjainak megteremtésére irányuló efféle próbálkozásaink már a kezdet kezdetétől fogva kudarcra vannak ítélve.

Az elképzelés, mely szerint a tudomány az egyetemes nyelv, a legerőteljesebben a matematikával kapcsolatban mutatkozik meg. Sok tudós értekezett már arról a látszólag varázslatos körülményről, hogy a matematika a Világegyetem leírására alkalmas eszközként „használható”. Albert Einstein egy alkalommal kijelentette, hogy „a Világegyetem legfelfoghatatlanabb tulajdonsága éppen a felfoghatósága”. Néha elgondolkodtam azon a tényen, hogy egy közönséges emberi lény egy emberéletnél rövidebb idő alatt mennyi mindent meg tud tanulni a Világegyetemről, vagyis ily módon a Világegyetem a számára „felfoghatóvá” válik. Ma már úgy gondolom, hogy ez egyáltalán nem olyan titokzatos dolog. Pickering arról győz meg, hogy az ellenkező végén néztem bele a távcsőbe, amikor ezt rejtélyesnek találtam. John Polkinghorne-t idézi, a brit kvantumfizika egyik elméleti képviselőjét, aki emellett az anglikán egyház lelkésze is, aki szerint „nem triviális tény a világgal kapcsolatban, hogy meg tudjuk érteni, mint ahogy az sem, hogy a matematika tökéletes nyelvet jelent a fizikai tudományok számára; vagyis egyetlen szóval az, hogy egyáltalán létezhet természettudomány.”⁸⁴

84 Ennek és a következő idézetnek a forrása: Pickering: Constructing Quarks, 413. oldal.

Pickering szerint azonban az ilyen állítások tévesek:

A tudósok problémamentesen képesek számot adni az általuk felfoghatónak talált világról: figyelembe véve kulturális háttérüket, csak a rendkívüli alkalmatlanság akadályozhatja meg a (fizikusok) közösségének tagjait abban, hogy a történelem tetszés szerinti pillanatában létrehozzák a valóság érthető változatát. Figyelembe véve továbbá jártasságukat a bonyolult matematikai módszerekben, éppoly magától értetődő, ha a részecskefizikusok túlnyomórészt a matematika nyelvén adnak számot a valóságról, mint amennyire természetesnek találjuk, hogy valamely népcsoport elfogult a saját anyanyelve iránt.

Más szavakkal tehát, az a „rejtély”, miszerint a matematika alkalmas nyelv a Világegyetem leírására, semmivel sem figyelemreméltóbb, mint az a felismerés, hogy az angol nyelv kiválóan alkalmas drámák írására. Ha a világképek valóban a kultúra termékei, amint azt Pickering és Kuhn állítja, akkor egyáltalán nem meglepő, hogy a kvantumvalóságnak különböző értelmezései léteznek. Mielőtt azonban továbbmennénk ebben az irányban, talán a tudomány egy másik területéről vett néhány példa segít meggyőzni Önöket arról, hogy valóban nem meglepő, ha a matematika segítségével le tudjuk írni a Világegyetemet, és arról, hogy a valóság matematikai leírásának értelmezése nagymértékben (vagy talán teljesen) választás kérdése.

Einstein megítélése

A matematika erejét mutatja a világ leírásában az a történet, amelyet gyakran szoktam idézni. A XIX. század matematikusai absztrakt geometriai elképzeléseket dolgoztak ki, amelyeknek látszólag semmi közük nem volt a valóságos Világegyetemhez, később azonban kiderült róluk, hogy kulcsfontosságú szerepet játszanak Albert Einstein általános relativitáselméletében. Az egyik szórakoztató csavar a történetben az, hogy először még maga Einstein sem ismerte fel a geometriai fogalmak jelentőségét. Szinte erőszakkal kellett felhívni rájuk a figyelmét, és csak ezt követően világosodott meg számára, hogy ennek a matematikának a használatával tudja kidolgozni világmodelljét.

Einstein általános relativitáselméletének kulcsfontosságú eleme a görbült téridő fogalma. A téridő geometriájának az elképzelése azonban nem Einsteintől eredt, de még csak nem is ő volt az első, aki a tér görbültségével foglalkozott. Pedig éppen a geometria fogalmai segítségével lehet Einstein mindkét relativitáselméletét könnyen megérteni. A tér és az idő, amint a második fejezetben láttuk, egy négydimenziós képződmény, a téridő részei. Az állandó sebességű, egyenletes mozgásokkal foglalkozó speciális relativitáselmélet egy sík, négydimenziós felület geometriájának fogalmaival magyarázható. A speciális relativitáselméletnek azok az egyenletei, amelyek például az idődilatáció különös jelenségét, vagy a mozgó testek összenyomódásának a módját írják le, nem mások, mint a Pitagorasz-tétel tétel jól ismert egyenletei, négy dimenzióra kiterjesztve.

Ha ezt magunkévá tettük, akkor már könnyű megérteni Einstein általános relativitáselméletét is, amely a gyorsulások és a gravitáció elmélete. Amire általában a Világegyetemben elhelyezkedő anyagcsomók (mint például a Nap) által kifejtett erőként szoktunk gondolni, azt a téridő szerkezetének torzulásai hozzák létre. A Nap például bemélyedést hoz létre a téridő szerkezetében, a Föld Nap körüli pályája pedig annak eredményeképpen alakul ki, hogy a Föld megpróbálja megkeresni a görbült téridőben a lehető legrövidebb útvonalat (geodetikus vonalat) a maga számára.

Természetesen, ha a pálya részleteit ki akarjuk számítani, akkor néhány egyenletre is szükségünk van. Ezt azonban a matematikusok gondjára bízhatjuk. A fizika megnyerően egyszerű és lényegre törő. Ezt az egyszerűséget gyakran Einstein „egyedülálló zsenialitásának” a javára írják.

Csak hogy a lényegre törő egyszerűségből semmi sem Einsteintől származik.

Vegyük szemügyre először a speciális relativitáselméletet. Amikor Einstein 1905-ben a világ elé tárta, az egy egyenleteken alapuló, matematikai elmélet volt. Nem volt különösebben nagy hatással a kortársakra, még évek teltek el, mire a széles tudományos közvélemény valóban felfigyelt az elméletre. Ez csak akkor történt meg, miután Hermann Minkowski 1908-ban egy előadást tartott Kölnben. Ez volt az a nyomtatásban 1909-ben, röviddel Minkowski halála után napvilágot látott előadás, amely először mutatta be a speciális relativitáselméletet a téridő geometriájának a fogalmaival. Már Minkowski bevezető szavai is jelzik az új látásmód erejét:

A térnek és az időnek az a képe, amelyet be fogok mutatni Önöknek, a kísérleti fizikából ered, és éppen ebben rejlik ereje. A nézetek radikálisak. Ennélfogva maga a tér és maga az idő a feledés homályába merül, és csak a kettő egyesítése őrződik meg független valóságként.⁸⁵

Minkowski hihetetlenül leegyszerűsítette a speciális relativitáselméletet, aminek óriási hatása lett. Nem véletlen, hogy Einstein 1909 júliusában a Genfi Egyetemen kapta meg első tiszteletbeli doktori címét mint ahogy az sem véletlen, hogy egy évvel később jelölték először a Nobel-díjra.

Mindebben némi finom irónia rejtőzik. Korábban, a XIX. század végén Minkowski Einstein egyik tanára volt a zürichi műszaki főiskolán. Alig néhány évvel a relativitáselmélet közreadása előtt Minkowski még „lusta kutyaként” jellemezte Einsteint, aki „nem különösebben zavartatja magát a matematikával”. Magát a lusta kutyát eleinte nemigen nyűgözte le a relativitáselmélet geometrizálása, bizonyos időbe telt, mire felismerte ennek a jelentőségét. Minthogy a műszaki főiskolán valóban nem sokat foglalkozott matematikával, teljesen elkerülte a figyelmét a XIX. század egyik legjelentősebb matematikai felfedezése, és csak barátja és kollégája, Marcel Grossman noszogatására kezdett a görbült téridő

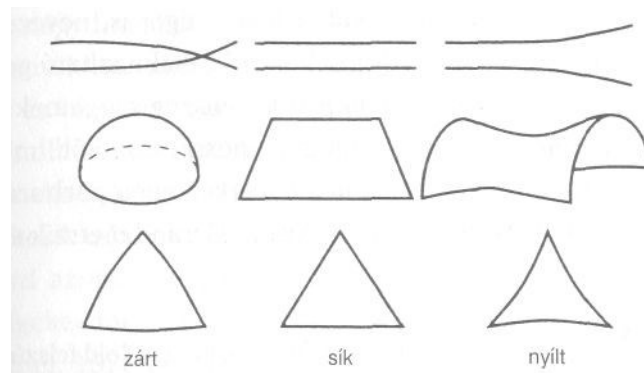
85 Idézi: Abrahám Pais: *Subtle is the Lord* (Oxford University Press, Oxford, 1982), 152. oldal. Az alfejezet többi idézete is ugyanebből a forrásból származik.

fogalma iránt érdeklődni.

Nem ez volt az első alkalom, amikor Einstein igénybe vette Grossman segítségét. Grossman Einstein évfolyamtársa volt a főiskolán, ám sokkal szorgalmasabb nála, aki (Einsteinnel ellentétben) nemcsak eljárt az előadásokra, hanem a hallottakról részletes jegyzeteket is készített. Ezek voltak azok a jegyzetek, amelyeket az utolsó pillanatban elkeseredett erőfeszítéssel bemagolva Einstein 1900-ban sikeresen le tudta tenni a főiskolai záróvizsgáit.

Grossman tudott valamit, amit Einstein nem, mindaddig, amíg Grossman 1912-ben fel nem hívta rá a figyelmét. Nevezetesen azt, hogy a geometria (még a sokdimenziós geometria is) sokkal több a jó, öreg, euklideszi síkgeometriánál.

Az euklideszi geometria az, amit az iskolában tanulunk, ahol a háromszög szögeinek az összege pontosan 180° , a párhuzamosok soha nem metszik egymást, és így tovább. Az 1777-ben született Kari Friedrich Gauss volt az első, aki túllépett az euklideszi geometria keretein, és ennek fel is ismerte a jelentőségét. Nagy matematikai felfedezéseit 1799-re teljesítette ki. Minthogy azonban nem különösebben törődött azzal, hogy eredményeit publikálja, a nemeuklideszi geometriát tőle függetlenül két kortársa is felfedezte. Egyikük a magyar Bolyai János volt, a másik pedig az orosz Nyikolaj Ivanovics Lobacsevszkij, aki 1829-ben elsőként publikálta egy ilyen geometria leírását.



20. ábra A tér szerkezete a három alapvető geometria valamelyikének kell megfeleljen. Ezeket két dimenzióban tudjuk ábrázolni, jóllehet a tér háromdimenziós.

Ha a tér görbülete pozitív, akkor a Világegyetem zárt. Pozitív térgörbület esetén (balra) a párhuzamosan induló vonalak (a fogalom szokásos értelmében) metszhetik egymást, a háromszögek szögeinek összege pedig több mint 180° . Ha a tér görbülete negatív, a Világegyetem nyílt. A negatív görbületű térben (jobbra) a párhuzamosan induló egyenesek széttartóak lehetnek, a háromszögek szögeinek összege pedig 180° -nál kisebb.

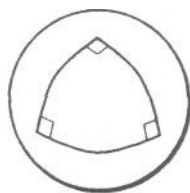
Ha a tér sík, akkor a párhuzamos egyenesek és a háromszögek a geometria iskolában megtanult szabályainak engedelmeskednek (euklideszi geometria). A sík tér (középen) a pozitív és a negatív görbület közötti, speciális határeset.

Világegyetemünk szerkezete megkülönböztethetetlenül közel esik a síkhoz.

Mindhárman lényegében ugyanarra a típusú „új” geometriára bukkantak rá, amelyik az úgynevezett „hiperbolikus” felületeken működik - ilyen egy nyereg vagy egy hegyi hágó geometriája. Az ilyen görbült felületen a háromszög szögeinek összege mindig 180° -nál kisebb, továbbá fel lehet rajzolni a felületre egy egyenest és egy az egyenesen kívül fekvő pontot, majd a ponton keresztül számos további vonalat

tudunk húzni, amelyek egyike sem metszi az eredeti vonalat, ennél fogva párhuzamos vele.

Gauss tanítványa, Bernhard Riemann volt az, aki az 1850-es években szilárd alapokra helyezte a nemeuklideszi geometriát. Ő ismerte fel a téma egy további variációjának a lehetőségét is, nevezetesen a gömb zárt felületére (például a földfelszínre) alkalmazható geometriát. A szférikus (gömbi) geometriában a háromszög szögeinek összege mindig 180° -nál nagyobb, és bár minden „hosszúsági kör” merőlegesen metszi az egyenlítőt, vagyis ennek következtében párhuzamosoknak kell lenniük egymással, mégis a pólusoknál mind metszik egymást.



21. ábra A gömbfelület, mint például a Föld felszíne, a zárt felületek östípusa. A gömbfelületen a háromszög szögeinek az összege akár 270° fok is lehet, vagyis olyan háromszög is rajzolható, amelynek mindhárom szöge derékszög.

Riemann 1854. június 10-én előadást tartott „A geometria alapját alkotó hipotézisekről” címmel. Ebben az előadásában - amely azonban csak 1867-ben, a Riemann halálát követő évben jelent meg nyomtatásban - rendkívül sok kérdést érintett. Többek között használható definíciót adott a tér görbületének jelentésére és mérésére, továbbá megadta a szférikus geometria első leírását (sőt még azt a feltevést is megemlíttette, hogy talán az a tér is enyhén görbült lehet, amelyben élünk, vagyis az egész Világegyetem zárt, hasonló egy gömb felületéhez, de nem két, hanem három dimenzióban). Végül, de nem utolsósorban, az összes kérdés közül a legfontosabbként bemutatta a geometria kiterjesztését az algebra segítségével sok dimenzióra.

Riemann 1866-ben, 39 éves korában tuberkulózisban meghalt. Ám nem Einstein volt a második, aki elgondolkodott a Világegyetemben a tér esetleges görbültségéről. A Riemann munkássága és Einstein születése közötti időszakra esik William Clifford angol matematikus élete és munkássága, aki 1845 és 1879 között élt, és aki Riemannhoz hasonlóan ugyancsak tuberkulózisban halt meg. Clifford lefordította Riemann műveit angolra, és jelentős szerepet játszott abban,

hogyan a görbült tér gondolata és a nemeuklideszi geometria részletei elterjedtek az angol nyelvű világban. Tudott annak a lehetőségéről, hogy a háromdimenziós Világegyetem, amelyben élünk, esetleg zárt és véges lehet, de egy legalább négydimenziós geometriában. Ez például azt jelentené, hogy hasonlóan ahhoz, ahogyan a gömb alakú Földön valamely irányban elinduló és végig irányváltoztatás nélkül haladó utazó végül visszaérkezik kiindulási pontjába, a zárt Világegyetemben a tér egy tetszőleges irányába elinduló, és végig egyenesen haladó utazó végül ugyancsak visszaérkezik oda, ahonnan elindult.

Clifford azonban azt is felismerte, hogy a tér görbülete nagyobb lehetőségeket tartogat az egész Világegyetemre kiterjedő, fokozatos görbületnél. 1870-ben a Cambridge-i Filozófiai Társaságban bemutatta egy dolgozatát (abban az időben Newton egykori egyetemének, a Trinity College-nak a munkatársa volt), amelyben leírta a „tér görbülete változásának” lehetőségét. Eszerint a görbület nagysága helyről helyre változhat. Felvetette, hogy „a tér kis tartományai ténylegesen olyanok, mint a kis dombok (a Föld) egyébként átlagosan sima felszínén; ami azt jelenti, hogy a közönséges geometria törvényei nem érvényesek ezekben a tartományokban”. Más szavakkal tehát, már hét évvel Einstein születése előtt Clifford eltöprengett a tér szerkezetének lokális torzulásairól - nem foglalkozott azonban azzal a kérdéssel, hogy minek a hatására alakulhatnak ki ezek a torzulások, mint ahogyan azzal sem, milyen megfigyelhető következménye lehet a torzulások létezésének. Lényeges különbség továbbá, hogy az általános relativitáselmélet szerint a Nap és a csillagok bemélyedéseket, nem pedig dombokat hoznak létre, ráadásul nem a tér, hanem a téridő szerkezetében.

Clifford csak egyike volt annak a számos kutatónak, akik a XIX. század második felében a nemeuklideszi geometriát tanulmányozták - bár egyike volt a legjobbaknak, mert sok zseniális meglátása volt arra vonatkozóan, mit jelenthet mindez a valóságos Világegyetemre nézve. Meglátásai különösen merészek voltak, érdemes eljátszani a gondolattal, milyen messzire juthatott volna az elsőség megszerzésében Einsteinnel szemben, ha nem halt volna meg 11 nappal Einstein születése előtt.

Amikor Einstein kidolgozta a speciális relativitáselméletet, akkor tájékozatlansága miatt teljesen figyelmen kívül hagyta a XIX. század matematikusainak a sokdimenziós és görbült terek geometriájára vonatkozó eredményeit. A speciális relativitáselmélet nagy eredménye, hogy összeegyeztette a fény Maxwell-féle elektromágneses egyenletek által leírt viselkedését (különös tekintettel arra a körülményre, hogy a fénysebesség univerzális állandó) a mechanikával - bár ennek az volt az ára, hogy el kellett vetnie a newtoni mechanikát, és azt valami jobbal helyettesítette.

Minthogy a XX. század elejére már nagyon nyilvánvalóvá vált a newtoni mechanika és a Maxwell-egyenletek összeegyeztethetetlensége, gyakran azt szokták mondani, hogy a speciális relativitáselmélet jelentős mértékben kora szülöttjének tekinthető, és ha Einstein nem állt volna elő 1905-ben az elmélettel, akkor egy vagy két éven belül ugyanezt megtette volna valaki más.

Másrészt viszont Einstein óriási ugrását a speciálistól az általános relativitáselméletig - az új, nem-newtoni gravitációelméletig - általában egy különleges zseni korát évtizedekkel megelőző, nagy dobásának tartják, amely kizárólag Einsteintől eredt, és aminek nem volt előfutára a kor fizikusai és az általuk tárgyalt problémák körében.

Ez igaz lehet, ám ez a hagyományos történet elfelejti megemlíteni, hogy Einstein (több mint egy évtizedig tartó) útja a speciálistól az általános relativitáselméletig sokkal kacskaringósabb és bonyolultabb volt, mint amilyen lehetett volna. Az általános relativitáselmélet éppoly természetes folyománya a XIX. század végi matematika eredményeinek, mint amilyen magától értetődően következett a speciális elmélet a XIX. század végének fizikájából.

Ha Einstein nem lett volna „lusta kutya”, és nagyobb figyelmet szentelt volna a főiskolán a matematika előadásoknak, akkor nyugodtan előállhatott volna az általános relativitáselmélettel, rögtön a speciális elmélet 1905-ben történt kidolgozása után. Ha pedig Einstein meg sem született volna, akkor minden valószínűség szerint valaki más - talán éppen maga Grossman - lett volna képes Riemann és Clifford munkásságára támaszkodva a XX. század második évtizedében előállni a gravitáció geometriai elméletével.

Ha Einstein legalább megértette volna a XIX. század geometriáját, akkor sokkal gyorsabban kidolgozhatta volna két elméletét. Nyilvánvaló lett volna, miként következik a két elmélet a korábbi kutatók munkáiból. Ekkor talán kevesebbet hallottunk volna Einstein „páratlan meglátásáról”, viszont világosabban látnánk, miként illeszkedtek elképzelései a matematika fősodrába, sőt talán az általános relativitáselméletért még a Nobel-díjat is megkapta volna.

Ez legalábbis az egyik lehetőség, ahogy a történetet előadhatjuk, hangsúlyozva a matematika erejét. Valójában a történetnek ez a változata pontosan követi annak a cikkemnek a gondolatmenetét, amely 1993-ban jelent meg a New Scientist-ben. A cikkem megjelenését követően azonban üzenetet kaptam Bruno Augensteintől, a kaliforniai Santa Monica-i RAND kutatójától. Amit Augenstein elmondott, az egészen más megvilágításba helyezi a történetet, és segített meggyőzni magamat arról, hogy Pickeringnek igaza van a tudomány működési módját illetően.

„Egy ideig”, írta Augenstein, „a Wigner/Dyson iskola híve voltam (»a matematika ésszerűtlenül nagy hatékonysága a fizikai tudományokban...«), ma már azonban meggyőződésem, hogy az Ön cikkében kifejtett fogalmat erős, működőképes axiómának kell tekintenünk. Azaz: a matematikai fogalmak szó szerint minden változatának valahol megfelel egy fizikai modell, és az okos fizikusnak érdemes munkája részeként tudatosan és rutinszerűen megkeresnie a már felfedezett matematikai szerkezetek fizikai modelljeit”.

Más szavakkal tehát, amint azt Pickering is felvetette, a fizikusok képesek bármilyen ellentmondásmentes nyersanyagból megalkotni a valóság érthető változatát.

El kell ismernem, hogy nem kizárólag az én cikkem világos fogalmazása és éleslátása győzte meg Augensteint arról, hogy ez a helyzet. Már korábban ráakadt a matematika egy meglehetősen zavaros, a Banach-Tarski-tételekkel (BTT) kapcsolatos fejezetére (amit a „halmazelmélet kissé szürrealisztikus szegletének” nevez). Itt is szép példájára bukkant annak, amikor egy elvont matematikai eredmény, amelyről eredetileg azt gondolták, hogy semmi köze sem lehet a valósághoz, mégiscsak megtalálja a maga hasznosulását a fizikában. Ebben az esetben ez a hasznosulás nem más, mint Gell-Mann és Zweig eredeti kvarkelmélete.

Nem szeretnék belemenni a részletekbe, nem akarom a „halmazelmélet kissé szürrealisztikus szegletéről” alkotott véleményemet kifejteni, inkább Augenstein szavaira hivatkozom.⁸⁶ A lényeg az, hogy Banach és Tarski (1924-ben publikált) munkája azzal foglalkozik, milyen módon tudnak a dolgok alkotórészeikre szakadni, majd hogyan tudnak az alkotóelemek más formában csoportosulva valami újat létrehozni.⁸⁷ Amint Augenstein rámutat: „az A szilárd testet tetszőleges m számú, de véges méretű és bármilyen alakú darabra vágjuk, majd anélkül, hogy a darabokat megváltoztatnánk, összerakjuk őket egy véges méretű és tetszés szerinti alakú B testté”.

Valóban kissé szürrealisztikus, ráadásul annyira általános, hogy aligha lehet bármilyen gyakorlati haszna. Ezért a halmazok viselkedésének speciális eseteként csak szilárd gömbök vizsgálatára szorítkozott. Nevezetesen, ha egy egységnyi sugarú, szilárd gömböt úgy vágunk öt részre, hogy azok közül kettő összeálljon egy ugyancsak egységnyi sugarú, szilárd gömbbé, akkor a megmaradó három darabból ugyancsak összeállítható egy egységnyi sugarú, szilárd gömb. Ez a legkisebb számú darab, amellyel a trükk még működik, de a folyamat tetszés szerinti számú lépésben ismételgethető. Ezek után talán már sejtik, mi fog mindebből kikerekedni.

A *Speculations in Science and Technology* folyóiratban megjelent cikkében Augenstein rámutat arra, hogy az ezeknek a matematikai halmazoknak és részhalmazoknak a viselkedését irányító szabályok formailag pontosan ugyanolyanok, mint amely szabályok a kvarkok és a gluonok viselkedését írják le a részecskefizika standard modelljében, vagyis a kvantumszíndinamikában. Utóbbi elméletet fél évszázaddal az eredeti BTT cikk megjelenése után dolgozták ki, ám a standard modellt kifejlesztő fizikusok semmit sem tudtak a halmazelméletnek erről a kissé szürrealisztikus szegletéről. Emlékezzünk vissza, hogy ebben a modellben a neutronok és a protonok kvarkok tripletjeiből állnak, továbbá a protonokat és a neutronokat összetartó gluonok (a kvantumelektrodinamika fotonjaival azonos szerepű részecskék) kvarkok páraiból állnak.

⁸⁶ Ezeket az a tény is megerősíti, hogy elgondolásait a *Speculations in Science and Technology* közlésre alkalmasnak találta. Címe ellenére ez egy roppant tekintélyes, tudományos folyóirat.

⁸⁷ S. Banach és A. Tarski: *Fundamenta Mathematica* 6 (1924), 244. oldal.

A gömb feldarabolásával és két új gömbbé történő összeállításával foglalkozó BTT folyamat pontosan leírja azt a titokzatos jelenséget, amelynek során egy proton behatol egy fém céltárgyba, aminek hatására a proton másolatainak raja szabadul fel a céltárgyból, amelyek mindegyike pontosan azonos az eredeti protonnal. A BTT-t az elméleti matematika legmeglepőbb eredményének tartják. Ezt a vélekedést Augenstein is osztja, és nyilván Önök is hajlanak rá, hogy elfogadják.

Különös módon Augenstein analógiája előrejelzéseket is tesz. Valaha a protonokat szerkezet nélküli biliárdgolyóknak tekintették, majd nagy energiájú elektronokkal megszondázták, miáltal felderítették a belsejében a három kvarkot (hasonlóan, ahogy Rutherford megszondázta az atomokat, amikor felfedezte az atommagot). A kísérleti fizikusok a legújabb terveik szerint arra vállalkoznának, hogy nagyobb energiákat elérve még a kvarkok „belsejét” is megszondázzák - ha egyáltalán van valami a kvarkokban. Érdekes módon az öt matematikai „darab” a Banach-Tarski-tételek Augenstein-féle változatában furcsa keverék: a darabok közül négy nagyon részletes szerkezetet tartalmaz a kvarkon belül, míg az ötödik egyetlen pont matematikai leírásának felel meg.

Nem Augenstein az egyetlen, aki kíváncsi volt a Banach-Tarski-tételek részecskefizikai folyományaira. Roger Jones 1982-ben, *Physics and Metaphor* című könyvében így ír:

Miért létezik a müon, amikor semmi mást nem tesz, mint amit az elektron is megtesz...? A müon durván 200-szor nagyobb tömegű az elektronnál ... a kétfajta részecske (csak) egyetlen tulajdonságában különbözik egymástól: ez a tömegük. Más részecskék több tulajdonságukat tekintve is különböznek egymástól, de az elektron és a müon annyira hasonlítanak egymásra, mint két szakasz, amelyeket pontosan ugyanolyan elemi pontokból raktunk össze, csak éppen különböző hosszúságúra. Az elektron és a müon különböző méretű golyók, de ugyanannyi pontból állnak. ... Maga a méret, a mérték és a szám csak valaminek a pusztá megjelenései és metaforái, nem szabad összetévesztenünk őket a végső invariánssal - és nem kell bálványozni őket. Azonban a háromdimenziós mérés, a térfogat esetében van még egy megfontolás, amely visszadöbrent. Ez Banach és Tarski meghökkentő tétele, amelynek értelmében egy adott méretű gömb szétszedhető, és darabjaiból egy másik, eltérő méretű gömb rakható össze. ... az elektron véges számú lépésben müonná alakítható. Ahhoz képest, hogy ma az anyagot valamilyen, a matematikai térben létező, absztrakt eloszlásnak tekintjük ... amiről valójában beszélünk, az egy sokkal szerveesebb, egységes és kaotikus térérzés. Ez nem olyan tér, amelyből valami hiányozna, hanem olyan, amelyik különbözik a miénktől - tehát egy másik metafora.

Vajon elfogadják a fizikusok ezeket az elképzeléseket, és kidolgoznak egy új „standard modellt”, amelyik túlmegy a valóság kvantumszindinamikai leírásán? Vagy elmegy a kedvük az egésztől és csak a tudomány vargabetűjének fogják tartani, egy bizarr matematikai furcsaságnak, amelyiknek semmilyen fizikai tartalma sincs? Majd meglátjuk. Augenstein a fizikusok által a valóságról adott leírásokat tündérmeséhez hasonlítja, és hangsúlyozza, hogy a fizikusok

hozzáállításában és szokásaiban csak akkor kellene számottevő változásnak bekövetkeznie, ha komolyan akarnák venni azt az elképzelést, mely szerint tetszés szerinti összetevőkből a kívánságunk szerinti modell kikeverhető. A hozzáállás ilyen változása csak hosszú idő alatt következhet be, ha egyáltalán bekövetkezik; ám mindenesetre erősen visszhangozza Pickering végkövetkeztetését arról, ahogy a fizikusok előhozakodnak modelljeikkel, majd más fizikus-filozófusok ezeket továbbfejlesztik, és azt vizsgálják, honnan jönnek ezek a modellek, és hogyan tudnák a fizikusok a markukban tartani az egész világot.

Valójában egyes fizikusok már most is a Pickering és Augenstein által megjelölt irányban haladnak, anélkül hogy felismernék annak a jelentőségét, amit csinálnak.

A leírhatatlan leírása

Miután belemártottuk a lábujjunk hegyét a halmazelmélet szürreális medencéjének zavaros vizébe, szeretnék egy rövid példát bemutatni a kozmológia területéről, mielőtt visszatérnénk ahhoz a kérdéshez, hogy miként vélekednek a filozófusok arról, mire való az egész fizika.

Ahogy a részecskefizikusok a kvarkjaikkal és a kvantumszíndinamikájukkal „megmagyarázzák”, hogyan működik a mikrovilág, a kozmológusoknak is van egy standard modelljük a makrovilág működéséről, amelyben az anyag, a gravitáció és az általános relativitáselmélet játszik szerepet. Az egyik nagy probléma - vagy talán „A” nagy probléma - a kozmológusok standard modelljével, az Ősrobbanás-elmélettel az, hogy a Világegyetem születése pillanatában egy szingularitás van jelen. A csillagászok tudják, hogy a Világegyetem tágul, mert távcsöveik megmutatják az egymástól távolodó galaxisokat. Einstein általános relativitáselmélete megjósolta ezt a tágulást, mert az elmélet szerint az idő múlásával a galaxisok közötti térnek meg kell nyúlnia. Az elmélet és a megfigyelés egyaránt arra enged következtetni, hogyha ezt a folyamatot gondolatban időben visszafelé lejátszva következtetni próbálunk a Világegyetem múltjára, akkor el kell érkeznünk egy pillanathoz, amikor a Világegyetem összes anyaga és maga a téridő egyetlen pontba, az úgynevezett szingularitásba koncentrálódott.

A szingularitás olyan hely, ahol a fizika általunk ismert törvényei érvényüket veszti. Ha az egyenleteket szó szerint értjük, akkor egy nulla kiterjedésű és végtelen sűrűségű pontról van szó, ami képtelenségnek tűnik. Stephen Hawking és Roger Penrose már az 1960-as években megmutatták, hogy ha az általános relativitáselmélet a Világegyetem működésének pontos leírását adja (márpedig az összes bizonyíték - beleértve a kettős pulzárt is - fényében úgy tűnik, hogy ez így van), akkor elkerülhetetlenül meg kell követelnünk a szingularitás feltételezését az idő kezdetén. A körülöttünk napjainkban megfigyelhető tágulás az Einstein-egyenletekkel együtt azt bizonyítja, hogy a kezdet kezdetén léteznie kellett a

szingularitásnak.

De vajon ez a zavarba ejtő következtetés egyszerűen annak lehet a következménye, hogy rossz analógiát használunk? Az 1980-as években Hawking visszatért a Világegyetem eredetének rejtélyéhez, és másokkal együttműködve megpróbálta egy olyan modell keretében leírni a Világegyetemet, amely modell a kvantummechanika és az általános relativitáselmélet eredményeit egyaránt magában foglalja. E munka nyomán alakult ki néhány kozmológusban az az érzés, hogy a „sok világ” vagy a „sok történet” elképzelés valamelyik változatára mégiscsak szükség lehet, mert egyébként nincs mód arra, hogy egy, a Világegyetemen „kívüli” megfigyelő megfigyelésének eredményeképpen összeomljék a Világegyetem hullámfüggvénye, és egy egyedi történet lépjen az állapotok szuperpozíciója helyére. Van azonban Hawking megközelítésének még egy izgalmas vonása, egy új analógia, amelyik egészen újszerű megvilágításba helyezi az Ősrobbanást.

Korábban már említettem, hogy lényeges különbség van aközött, ahogyan a relativitáselmélet (a speciális és az általános elmélet egyaránt) egyenletei a teret és az időt kezelik. Az idő ugyanis negatív előjellel jelenik meg az egyenletekben. Ezzel azonban még nincs vége a történetnek, mert az egyenletekben - akárcsak a derékszögű háromszögekről szóló híres Pitagorasz-tételben - egyes mennyiségek négyzete is előfordul. Ennek megfelelően a térbeli elmozdulást jelentő paraméterek az Einstein-egyenletekben a négyzeten szerepelnek: x^2 , y^2 és z^2 . Az időbeli távolságot jellemző paraméter viszont egy negatív előjelű négyzetszám lesz: $-t^2$. Ez akadályozza meg, hogy az időt pontosan ugyanúgy kezeljük, mint a teret, hiszen már az iskolában megtanultuk, negatív számból nem lehet négyzetgyököt vonni. Ha ismerjük x^2 értékét, akkor x -et könnyűszerrel ki tudjuk számítani, tudjuk például, hogy 4 négyzetgyöke 2. Hiába ismerjük azonban $-t^2$ értékét, ez semmit sem jelent t értékére vonatkozóan. Mennyi lenne például mínusz 9 négyzetgyöke?

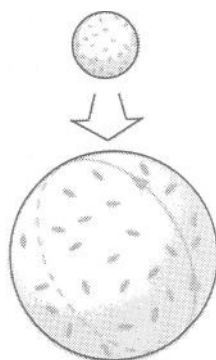
Hawking kimutatta, hogy a világ története kezdetét jelentő szingularitás - az idő „pereme” - problémája egy csaknem magától értetődő matematikai eszköz segítségével megoldható. A matematikusok mindent tudnak a negatív számok négyzetgyökéről. Ez már több mint 200 éve szerves része a matematikának, a matematikusok egyetlen, apró trükk segítségével tetszés szerinti műveleteket tudnak végrehajtani ezekkel a számokkal. Kitaláltak ugyanis egy i -vel jelölt „számot”, amelyet „négyzetgyök mínusz egy”-ként definiáltak. Ennek értelmében tehát $i * i = -1$. Ha ezek után például (-9) négyzetgyökére vagyunk kíváncsiak, akkor, figyelembe véve, hogy $-9 = (-1) \cdot 9$, azt mondhatjuk, hogy (-9) négyzetgyöke -1 és 9 négyzetgyökei szorzatával lesz egyenlő, azaz egyszerűen $i * 3$. Ezek az úgynevezett „képzetes (vagy imaginárius) számok” ugyanúgy kezelhetők, mint a közönséges számok, tehát összeadhatók, kivonhatók, szorozhatók és így tovább, ezért sok matematikai számításban nagyon fontos szerepet játszanak. Eszközt adnak a matematikusok kezébe a leírhatatlan leírásához, a negatív számok négyzetgyökeinek világában való mozgáshoz, miközben ugyanúgy működnek, mint a „valós” számok.

Hawking szemtelen ötlete értelmében az időről alkotott hétköznapi képünk helytelen, a Világegyetem működésének jobb modelljét kapjuk, ha méréseinkben az általa képzetes időnek nevezett ($i \cdot t$ -vel azaz it -vel jelölt) mennyiséget használjuk. Ami a matematikát illeti, a változtatás triviális. Az egésznek nem nagyobb a jelentősége, mint amikor a térképkészítő áttér a Föld ábrázolásában egy másik vetületi rendszerre. A Mercator-féle vetület például nagyban-egészében a kontinensek helyes alakját mutatja, azonban eltorzítja egymáshoz képesti méretüket. Ezzel szemben az 1970-es években kidolgozott, Peter-féle vetületben a kontinensek arányos méretűek egymáshoz képest, alakjuk azonban eltorzul. Mindkét vetületi rendszer (akárcsak a térképészetben használt többi) a földgömb egész felületét egy sík lapra vetítve ábrázolja. Minthogy azonban lehetetlen a gömb felületének pontjait tökéletesen levetíteni a síkra, ezért egyik vetületi rendszer sem nevezhető „helyesnek”, miközben a többit „helytelennek” tartanánk. Egyszerűen csak különböznek egymástól.

Hasonlóképpen, a matematikusok sokféleképpen megválaszthatják az események térbeli és időbeli pozíciójának leírásához használni kívánt koordináta-rendszert. Megemlíthetünk még egy földrajzi példát. Történelmi véletlennek tekinthető, hogy a földrajzi hosszúság mérésének kiinduló vonalaként éppen a londoni Greenwichen áthaladó délkört választottuk. A navigátorok számára bármely másik délkör is megfelelne „nulla fok földrajzi hosszúságnak”, vagyis akármelyik olyan képzelte vonalat használhatnák, amelyik áthalad az Északi- és a Déli-sarkon.

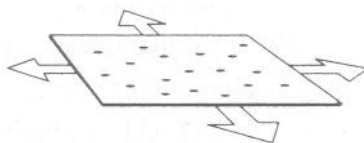
Hawking váltása a képzetes időre nem ennyire egyszerű, de az sem több a matematikai koordináta-rendszer megváltoztatásánál, mégis drámai hatása van, mert Einstein egyenleteiben azonos helyzetbe hozza az időre és a térre vonatkozó paramétereket. Ha az időt it egységekben mérjük, akkor az időt négyzetre emelve $(it)^2 = i^2 \cdot t^2$ adódik, vagyis egyszerűen $(-1) \cdot t^2$, azaz $-t^2$. Ezután az így kapott negatív szám előtt kell alkalmazni a magukban az Einstein-egyenletekben előforduló mínusz előjelet, aminek eredményeképpen az i^2 -ből eredő (-1) eltűnik (emlékezzünk csak vissza a mínusszor mínusz az plusz jól ismert szabályára), és csak t^2 marad meg.

A modell ilyen megváltoztatásának eredményeképpen az idő pontosan ugyanolyan szerephez jutott, mint a tér - legalábbis ami az Einstein-egyenleteket illeti. Kiderül azonban, hogy ez az aprócska matematikai változtatás eltünteti a szingularitást az egyenletekből.



22. ábra A táguló Világegyetem olyan gumilepedőként képzelhető el, amelyik minden irányban egyenletesen nyúlik. A pontok a galaxisokat jelölik. A galaxisok azért kerülnek egyre távolabb egymástól, mert az őket elválasztó „tér” tágul - nem pedig azért, mert ők maguk elmozdulnak a térhez képest.

Hawking szerint ezek után a táguló Világegyetemre már nem úgy kell gondolnunk, mint a téridő egy matematikai pontból (a szingularitásból) kiindulva növekedő buborékjára, hanem mint egy állandó méretű gömb felületére rajzolt szélességi körökre. A gömb északi sarka köré rajzolt kicsiny köröcske felel meg a fiatal Világegyetemnek - az egész teret a kört alkotó vonal jelenti. Ahogy a Világegyetem tágul, az egyre későbbi állapotait a pólustól egyre távolabbi, de az előzővel párhuzamos körök jelentik. Az idő múlásával egyre távolodunk a pólustól, és közeledünk az egyenlítő felé, miközben a körök egyre nagyobbak lesznek. A pólustól az egyenlítő felé haladás jelöli ki az idő „múlását”. Miután átlépjük az egyenlítőt, a „Világegyetem” elkezd összehúzódni, az egymást követő szélességi körök egyre kisebbekké válnak, míg végül a Déli-sarkon teljesen eltűnnek.

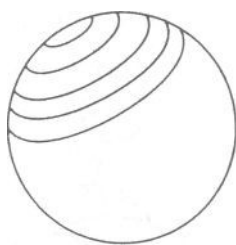


23. ábra Előfordulhat, hogy a Világegyetem közel sík, mégis éppen csak, hogy zárt. Ebben az esetben egy táguló szappanbuborék hártájához hasonlítható, amelynek felületén a pontok a galaxisokat jelentik, akárcsak a 22. ábrán. Ebben az esetben azonban fennáll az a különös lehetőség, hogy körbeutazva a Világegyetemet vissza tudunk érkezni kiindulópontunkra, jóllehet eközben mindvégig egyenes irányban mozgunk, pontosan úgy, ahogyan az a Föld körülhajózásakor történik.

De vajon mi történik magukban a pólusokban - vagyis az idő kezdetén és a végén? A gömbnek ezekben a pontokban sincs „széle”, noha azt mondjuk, hogy az idő az északi pólusnál kezdődik. Minthogy az idő pontosan ugyanolyan matematikai alapokon nyugszik, mint a tér, ezért a földrajzi analógia tökéletes. Bolygónkon az Északi-sarkon minden irányban „dél felé” nézünk, az „északi” irány nem létezik - mégisincs „széle” a Földnek az Északi-sarkon. A Világegyetem Hawking-féle modelljének északi pólusán az idő egyetlen lehetséges iránya a

„jövő”, nem létezik a „múltak” megfelelő irány - ennek ellenére nincs az időnek „széle”. A szingularitás problémája tehát fel sem merül.

Ha visszafelé tudnánk utazni az időben, egészen magáig az Ősrobbanásig, akkor nem tűnnénk el a szingularitásban, hanem simán keresztülhaladnánk a „nulla időnek” megfelelő (idő)ponton, majd azt tapasztalnánk, hogy ismét a jövő felé haladnánk. Pontosan úgy, ahogyan a Földön az Északi-sark közelében tartózkodó utazó el tud indulni észak felé, majd amikor menetirányának megváltoztatása nélkül áthalad az Északi-sarkon, hirtelen azt tapasztalja, hogy dél felé megy. E kép szerint a Világegyetem a téridő és a tömeg-energia tökéletesen önkonzisztens csomagja, amely nem táguul sehová és nem is húzódik össze sehová.



24. ábra A téma Stephen Hawking-féle variációjában a teret és az időt (vagyis mind a négy dimenziót) egyaránt egy gömb felületével ábrázolhatjuk. A Világegyetem története az „északi pólusban”, a nulla időpontban, apró körként kezdődik. A kör átmérője fokozatosan nő, miközben az idő múlásával a gömb egyenlítője felé haladunk. Ezt követően viszont továbbmegyünk a déli pólus felé, miközben a Világegyetem fokozatosan semmivé zsugorodik. Nincsen azonban a téridőnek „széle”, éppúgy, ahogy a Földnek sincs „pereme” az Északi- vagy a Déli-sarkon. Ezzel az ábrázolásmóddal azt szándékozunk érzékeltetni, miért értelmetlen „az Ősrobbanás előtti” vagy a „Világegyetem történetének vége utáni” időről beszélni.

Mindezt egy egyszerû koordináta-transzformációnak köszönhetően sikerült elérnünk, amellyel az időt a térrel azonos helyzetbe hoztuk. Szerencsétlen körülmény, hogy a matematika nyelvén az i -t tartalmazó számokat képzetes számoknak nevezik, mert ennek következtében az időkoordináta Hawkingtől származó alternatívája is a képzetes idő elnevezést kapta, ami némi sci-fi vagy Alice Csodaországban ízt ad az egész történetnek.⁸⁸ Valójában azonban ez egy matematikai szempontból teljesen elfogadható eljárás, amely fizikailag sokkal ésszerűbbnek tűnik, mint a dolgok hagyományos tárgyalásmódja, mert kiküszöböli a rettegett szingularitást.

Más módon is feltárhatjuk az ebből eredő lehetőségeket. Hawking „téryszerűvé tette” az időt; Ilya Prigogine szerint viszont a dolgok működésének ez a

⁸⁸ A terminológia kétszeresen is szerencsétlen, mert Hawking valójában az időt kezeli úgy az egyenletekben, mintha képzetes tér lenne, hiszen az it pontosan ugyanazt a szerepet játssza, mint x , y vagy z .

megközelítése egyenértékű a tér „időszerűvé tételével”, ahol a teremtést a téridőben mindenütt, bizonyos értelemben egyidejűleg lejátszódó eseménynek tekinthetjük. Nem szándékozom azonban ennek a modellnek a részleteibe belemenni, csupán arra szeretnék rámutatni, hogy a szingularitás problémájára Hawking által adott válasz határozott rokonságot mutat Augenstein érvelésével, aki szerint a matematikában minden átalakítható a valóság fizikailag értelmes modelljévé. A fizika is munka, akárcsak az asztalosmesterség, amely a különféle nyersanyagokból valamilyen terméket hoz létre. Az asztalos a fából bútorokat készít, a fizikus nyersanyaga viszont a matematika világában található, a munka termékei pedig a különféle világmodellek. Ki látta volna előre két évszázaddal ezelőtt, amikor a képzetes számok világa még csak az elméleti matematika egyik sikeresen fejlődő ágát jelentette, hogy ezek a számok egyszer majd alkalmasak lesznek a Világegyetem keletkezésének magyarázatára?

Ám az alkalmazásra természetesen mindaddig várni kellett, amíg a fizikusok és a csillagászok ki nem dolgoztak egy új világképet, vagy modellt. Ebben olyan problémával találták szembe magukat, amelynek megoldásához kézenfekvőnek tűnt a képzetes számok használata. De hát végül is hogyan tudták a fizikusok megragadni a világ lényegét, és hogyan jutottak el a valóság jelenleg elfogadott leírásához?

Megragadjuk a valóságot

Martin Krieger, a Dél-Kalifornia Egyetem tanára izgalmas, DoingPhysics című könyvében mutatta be az egyik legújabb és legmeggyőzőbb magyarázatot arra vonatkozóan, miként fognak hozzá a fizikusok a valóság egy újabb modelljének a megkereséséhez (vagy Meszeléséhez). Krieger végignézte a XX. század második felében megalkotott egyes analógiákat és modelleket, és kimutatta, milyen mélyen gyökereznek ezek a modern kultúrában (nevezetesen az adott időszakban az Egyesült Államok kultúrájában), és milyen viszonyban állnak a korábbi generációk által használt modellekkel és analógiákkal. A legnyilvánvalóbb példa a kvantumelektrodinamika és a kvantumszíndinamika hasonlósága volt, illetve az utóbbit a Maxwell-egyenletekkel is összehasonlította. Ennek a munkának bizonyos áthallásai egyes filozófusok műveiben is megtalálhatók- mindenekelőtt az 1930-as évektől kezdve Kari Poppernél⁸⁹ -, amelyekben a XX. század természettudósainak munkásságát elemezték. Krieger azonban eredetileg fizikus volt, ami arra kellene, hogy ösztönözze fizikus kollégáit, hogy figyeljenek oda arra, amit mond. Emellett a történet Krieger-féle változata nemcsak korszerű, hanem különösen meggyőző is.

A fizikus képzettségű Krieger sok értelemben használja a fizika fogalmait, de

⁸⁹ Lásd például: Popper: The Logic of Scientific Discovery (Hutchinson, London, 1959).

mindent lefordít hétköznapi nyelvre. Ahol például a fizikusok a „szabadsági fokok”-nak nevezik egy rendszer bizonyos tulajdonságait, ott Krieger ezeket a tulajdonságokat „kapaszkodóknak” nevezi, amelyek segítségével megragadhatjuk a rendszert, és némi fogalmat alkothatunk arról, milyen is az illető rendszer. Egyszerű példa lehet egy gázzal teli tartály hőmérséklete. Ez az egyik szabadsági fok, és a gázzal teli tartály hőmérsékletének ismeretében bizonyos kijelentéseket tehetünk a gáz általános állapotára vonatkozóan. Egyetlen atom helyzete ugyancsak példaként említhető a szabadsági fokra - ám nem kell a tartályban lévő összes gázmolekula helyét ismernünk ahhoz, hogy tudjuk a hőmérsékletét. Ahelyett, hogy megpróbálná megmondani milyen is a világ, Krieger inkább azt hangsúlyozza, hogy minden analógiákra épül, és bemutatja, miként ragadják meg (a szabadsági fokok által nyújtott kapaszkodóknál fogva) és írják le a fizikusok a világot. A világ sok mindenhez „használó” lehet - hullámokhoz, biliárdgolyókhoz vagy bármi máshoz - anélkül, hogy azonos lenne ezen dolgok bármelyikével.

Az analógiák használatában azonban Krieger sokkal messzebbre megy mint ahogyan azt az iménti példákban bemutatam. Egyik szemléletes példájában a szubatomi világ működését egy ország gazdasága vagy egy gyár működésének analógiájával írja le. A kívülálló szemlélő csak azt látja, hogy a gyár kapuján bemennek a különböző nyersanyagok és kijönnek a késztermékek, a tényleges termelési folyamatot viszont nem látja, mert az a falak mögött történik, a gondos megfigyelő azonban a bemenő és kijövő anyagok összehasonlításából következtetni tud a termelési folyamatra. A falak ugyan elrejtik a gyártási folyamat részleteit - tehát elrejtik a szabadsági fokokat -, és a gyárat fekete dobozzá redukálják, amelynél a kívülálló csak azt látja, hogy meghatározott bemenő anyagokból meghatározott kijövő termékek keletkeznek. Ez Krieger szerint például azzal analóg, amilyen módon az atommagot körülvevő elektronfelhő elektronjai felelősek a kémiai tulajdonságokért, azonban magának az atomnak a belső működését elrejtik. A kémiai reakciókban csak az számít, milyen kölcsönhatás alakul ki az egyik és a másik atom legkülső elektronjai között, arról azonban semmit sem kell tudnunk, mi is tartja össze magukat az atomokat.

A falak nagyon fontosak, mert leegyszerűsítik a túlzottan bonyolult helyzeteket, és lehetővé teszik az értékes fizikai következtetések levonását anélkül, hogy mindent tudnunk kellene a rendszer részleteiről. A fizikusok tehát szándékosan falakat állítanak, a trükk abban rejlik, hogy meg kell győződnie arról, hogy valóban a megfelelő falakat állították-e fel. Valójában a lehetséges legtöbb szabadsági fokot szándékosan a falak mögé rejtik, majd a megmaradó néhány szabadsági fok változtatásának a hatását vizsgálják - mindez lényegében azt jelenti, hogy a megmaradt néhány „fogantyút” használva megragadják, és jól megrázzák a rendszert.

Jó példa a mondottakra a hőmérséklet. Sok, tartályba zárt gázokkal végzett kísérletben a fizikusok mindenekelőtt megvárják, amíg a gáz hőmérséklete beáll valamilyen állandó értékre - addig ugyanis nem beszélhetünk termodinamikai egyensúlyról. Ezután már nem kell tovább törődnünk a hőmérséklettel, miközben a gáz valamilyen más tulajdonságát vizsgáljuk - például azt, miként változik a

nyomása, miközben a belepréseljük a gázt egy fele akkora méretű tartályba (a gyakorlatban akkor tudjuk elvégezni ezt az egyszerű kísérletet, ha a tartályt összekapcsoljuk valamilyen, állandó hőmérsékletű, nagy testtel - egy úgynevezett „hőtartállyal” - ezáltal biztosítva, hogy összenyomása közben ne változzék a gáz hőmérséklete). Ha a gázt összenyomása közben még kívülről melegítenénk is, akkor sokkal nehezebb lenne szétválasztani az egyidejűleg változó szabadsági fokokat, és megállapítani, mi is történik valójában a gázzal. Ha ki tudjuk választani a megfelelő szabadsági fokokat, és csak azokat vizsgáljuk, akkor a fizika egyszerűvé válik. Ha ellenben hibát követünk el a szabadsági fokok kiválasztásánál, akkor a helyzet olyan rettenetesen bonyolulttá válhat, hogy soha az életben nem tudjuk kibogozni. Steven Weinberg megjegyzése szerint „egy fizikai rendszer jellemzésére tetszés szerinti szabadsági fokot használhatunk, de ha rosszul választunk, azt megbánjuk”.⁹⁰

A gyár analógiáját kiterjesztve Krieger a fizikusok elemi részecskékről alkotott fogalmait a gyár egyes munkásaihoz hasonlítja, akiknek különböző tulajdonságaik vannak, mindegyikre más ügyesség, mozgékonyság vagy bérkövetelés a jellemző. A „munkások” tulajdonságait a részecskékhez kapcsolt címkékre írhatjuk fel, a címkék alapján tudjuk azonosítani töltésüket, tömegüket vagy az erős kölcsönhatásra való reagálásuk erősségét. „A részecskék”, mondja, „úgy vannak megtervezve, hogy meghatározható a helyük, egymástól elkülönülnek, stabilak és objektíven léteznek, nevet adhatunk nekik, mégis egyediek”.⁹¹ A lényeg megint csak az, hogy a fizikusok nem tudnak behatolni a szubatomi világba, hogy ott rábukkanjanak az ott lévő részecskékre, hanem kiindulnak abból az elképzelésből, hogy milyenek a biliárdgolyók, majd olyasféle kérdéseket tesznek fel (úgy választják meg a szabadsági fokot), hogy részecskeszerű válaszokat provokáljanak ki.

Kíváncsiak lehetünk arra, hogy vajon félrevezetnek-e bennünket a biliárdgolyókról és falakról alkotott hétköznapi fogalmaink, ha megpróbáljuk a Természetet a naiv elképzeléseinkhez hozzáigazítani. Nos, minden bizonnyal félrevezetnek. Mégis lenyűgöző, ahogyan módosítjuk naiv elképzeléseinket, megtanítjuk saját magunkat arra, hogyan vegyük észre a hétköznapi tárgyak megfelelő tulajdonságait, hogy a Természetet általuk modellezhessük.

Jó példa lehet a spinnek nevezett kvantummechanikai tulajdonság. Amikor a fizikusok felfedezték, hogy a tömegén és a töltésén kívül még valami jellemzi az elektront, akkor a biliárdgolyó tulajdonságainak analógiájára ezt az új tulajdonságot a golyó forgásával állították párhuzamba, és spinnek nevezték el (spin = forgás, de magyarul - éppen a klasszikus mechanikai kép zavaró hatásának elkerülése érdekében - az angol szót eredeti formájában, fordítás nélkül használjuk - a fordító megjegyzése). Az analógia persze nem pontos, mert kiderült, hogy ha az elektront mindenáron forgó részecskeként akarjuk elképzelni, akkor ezt úgy kell tennünk, hogy az elektronnak nem 360, hanem 720 fokot (azaz

90 Idézi Krieger: Doing Physics, 30. oldal.

91 Ennek és a következő idézetnek a forrása: Krieger: Doing Physics, 22-23. oldal.

két teljes kört) kell elfordulnia ahhoz, hogy visszaérkezzék kiinduló helyzetébe.⁹² A fizikusok azonban már hozzászórtak ahhoz, hogy erre a furcsa tulajdonságra a biliárdgolyó vagy a Föld forgásának analógiája alapján gondoljanak.

A fizikusok világképének harmadik összetevője a falak és a munkások mellett az erőter. Az erőter pontosan a részecske ellentéte - szétterül, szemben a lokalizált részecskével, folytonosan változik, ahelyett, hogy határozott széle lenne. Az erők azonban mindig részecskékhez kapcsolódnak, és amint arra Krieger rámutat, egy tökéletes részecske teljes mértékben tartalmazza önmagát, és nincsenek olyan kapaszkodói, amelyeknél fogva megrázhatnánk. Létezésükről csak azért tudunk, mert a részecskékből kiszivárognak valamilyen hatások, például a gravitációjuk, az elektromágneses hatásuk vagy valami hasonló.

Ez azonban még nem jelenti azt, hogy az erőter „valóságosabb”, mint bármely részecske, vagy azt, hogy az elektron valóban bűgócsiga módjára forog a tengelye körül. Sokkal szívesebben fogalmazok úgy, hogy minden modell valóságos, még azok is, amelyek nem teljesek. Krieger érvelését követve feltehetjük a kérdést, hogy vajon milyen valóság létezik még, a modelljeinken kívül. Pickeringhez hasonlóan Krieger is elemzi a módszert, ahogyan a fizikusok elsajátítják a mesterségüket és sikeresen utánozzák a múltban sikeresnek bizonyult eljárásokat. Ezek közül az egyik legnagyobb erejű éppen annak feltételezése volt, hogy minden kisebb részekből épül fel. Részletesen tárgyalja az óramű analógia erejét, és rámutat (33. oldal), hogy „az órának sokkal kevesebb (de talán érdekesebb) tulajdonsága van, mint egyes alkatrészeinek együttvéve” - ami ismét azt támasztja alá, hogy a szabadsági fokok korlátozása előnyös lehet. Nem részletezi azonban azt a módszert, ahogyan Maxwell az egymással kölcsönható fogaskerekű és áttételek rendszerén, mint köztes lépésen keresztül eljutott híres hullámmegyenleteihez.

Ezt a lépést hagyományosan szükségtelennek tartják, mint a mankót, amikor a beteg már megtanult anélkül járni. Tény azonban, hogy a modell működött. Talán unalmas és nem túl vonzó, ám mégis működő modellt nyújt az elektromágneses erők közvetítésére. A térelmélet azért „jobb”, mert számunkra egyszerűbbnek és lényegretörőbbnek tűnik; ám az a körülmény, hogy a számunkra csúnyának és durvának tűnő óraműmodell mégiscsak működőképesé tehető, arra figyelmeztet, hogy a nekünk legszimpatikusabbnak tűnő analógiák nem feltétlenül jelentik a világ működésére vonatkozó egyetlen igazságot. Amikor a fizikusok kijelentik, hogy a Természet egy bizonyos módon működik, akkor Krieger érvelése szerint valójában azt mondják, hogy a modellek szabályszerűen működésbe hozhatók.

Íme, még egy példa, egy jobbra elvetett, ám mégis életképes hasonlat. Amikor az elektron-pozitron párok tiszta energiából történő keletkezését tárgyaltam, akkor a jelenség bemutatását arra a feltevésre alapoztam, hogy az energia az $E =$

92 Richard Feynman egy csésze teára alapozott modelljével ragyogóan szellemes példát ad arra, hogyan tudunk két fordulat megtétele után visszajutni kiinduló helyzetünkbe. A példa *Elementary Particles and the Laws of Physics* című könyve 29. oldalán olvasható.

mc^2 összefüggésnek megfelelően tömeggé alakul. Amikor azonban Paul Dirac az 1920-as évek végén először vetette fel a ma antirészecskékként ismert képződmények létezését, egészen más modellt használt. A valóságnak ebben a változatában a vákuum „ürességét” elektronok tengere tölti ki, ahol minden lehetséges negatív energiaszint jelen van. Ezeket az elektronokat nem vesszük észre, mert mindenütt jelen vannak, és nem adnak lehetőséget a környezetüktől való megkülönböztetésre. Ha egy falat egyszínűre festünk, például pirosra, akkor a fal minden pontja ugyanolyan piros, mint az összes többi, ezért egyetlen pont sem emelkedik ki a környezetéből. A közönséges (pozitív energiájú) elektronokat „észrevesszük”, mert különböznek a szomszédaitól, mintha kék festékfoltot pöttyentenénk a piros falra.

E kép értelmében elektron-pozitron pár keletkezése akkor következik be, ha egy elegendően nagy energiájú foton eltalál egyet a negatív energiájú elektronok közül, és elegendő energiát ad át neki ahhoz, hogy „előlépjen” a pozitív energiájú állapotba. Ezáltal a hétköznapi világ „valóságos” elektronjává válik (kék pöttyé), és lyukat hagy maga mögött a negatív energiájú elektronok tengerében (fehér folt a piros háttér előtt). Ennek a lyuknak minden egyéb tulajdonsága megegyezik az elektron tulajdonságaival, csak a töltése pozitív - vagyis egy pozitron jött létre. Ha például a közelben található egy pozitív töltés, akkor az összes negatív energiájú elektron a töltés felé törekszik. A lyuk szomszédságában található elektron viszont előrecselezi magát, beleugrik a lyukba, egy másik lyukat hagyva hátra maga mögött. A folyamat lépésenként ismétlődik, amit úgy látunk, mintha a lyuk tovaterjedne - vagyis mintha az eredeti pozitív töltés taszítaná a lyukat, pontosan úgy, mintha a lyuknak is pozitív töltése lenne. A negatív energiájú tengerben az elektron hiánya a környezettől való különbségnek felel meg, ahol a határvonal éles, ami éppen a részecskék ismertetőjele. A lyuk tehát megmarad, és részecskeként viselkedik, mindaddig, amíg egy pozitív energiájú elektron nem esik bele a lyukba. Ekkor az elektron energiája elektromágneses sugárzás formájában eltűnik.

Maxwell fogaskerekeihez és örvényeihez hasonlóan a részecske-antirészecske kölcsönhatásoknak ezt a modelljét is ma már átmeneti lépésnek tekintjük a részecskék tiszta energiából történő keletkezése, vagyis a jelenséget leíró „valódi” kép felé vezető úton. Ennek ellenére, ez egy teljesen ésszerű, ellentmondásmentes modell, amelyikre számításokat lehet alapozni, így pontosan előre jelezhetjük a pozitronok kísérletekben mért tulajdonságait. Ugyanakkor emlékezzünk csak vissza arra, hogy létezik még egy, a pozitronok létezését az elektronok időben visszafelé történő mozgásával kielégítően magyarázó modell. Esetleg kellemetlenül érezhetjük magunkat, ha arra gondolunk, hogy a Világegyetem tele van negatív energiájú elektronokkal, ez azonban a mi problémánk, nem a Világegyetemé. Mi saját tetszésünk szerint választhatjuk meg a vizsgálni kívánt szabadsági fokot, és ez a választásunk meghatározza, milyen tulajdonságokkal ruházzuk fel a Természetet. A fizikában minden az analógia, és feltéve, hogy az általunk alkotott modellek ellentmondásmentesek, és segítségükkel kísérletileg ellenőrizhető és igazolható előrejelzéseket tudunk tenni, szabadon megválaszthatjuk, hogy melyik analógiát kívánjuk használni, és tetszés szerinti szabadsági fokot is választhatunk. Ezáltal viszont visszajutunk ahhoz a

kérdéshez, hogy a kvantummechanika értelmezései közül melyik tekinthető a „legjobb ajánlatnak”, ha egyáltalán van ilyen.

A kvantumvalóság nagy tételben

Számomra úgy tűnik, hogy a legjobb válasz talán a nagy tételben történő bevásárlás lehet. Az értelmezések mindegyike életképes modell, és mindegyikük hasznos betekintést nyújt számunkra a világ működésének mikéntjébe. Valójában meglehetősen ésszerű a kvantummechanika minden egyes értelmezését önálló szabadsági foknak tekinteni, és Weinberg véleményét alkalmazva szabadon választhatjuk azt az értelmezést, amelyik az adott helyzetben a legjobban megfelel az igényeinknek. Ha rosszul választunk, magunkra vessünk - például akkor, ha a koppenhágai értelmezés segítségével akarjuk megmagyarázni, mi történik Schrödinger macskájaival. Ha viszont jól választunk - ebben az esetben például a sokvilág-értelmezést -, akkor minden leegyszerűsödik. A jó fizikus a kvantummechanika összes lehetséges értelmezését az eszköztárában tartja, és mindig a megfelelő alkalmazza, attól függően, hogy éppen milyen kvantummechanikai feladattal találja szembe magát.

A fentiek bizonyítására álljon itt egy rövid emlékeztető a kínálat néhány tételére, és arra, hogyan viszonyulnak Bell tételéhez, a kvantumfizika legjelentősebb fejleményéhez a XX. század második felében. A kvantumvalóság minden elfogadható változatának összhangban kell lennie az Aspect-kísérlet eredményével - és valóban, mindegyik összhangban is van azzal!

A jó öreg koppenhágai értelmezésnek semmi nehézséget sem okoz a Bell-tétel és az Aspect-kísérlet kezelése, mert Niels Bohr és kollégái arra tanítottak, hogy a kísérlet végkimenetele az egész kísérleti elrendezéstől függ. Ha a kétréses kísérletben mindkét rés nyitva van, akkor interferenciát kapunk; ha csak az egyik van nyitva, akkor nem kapunk. És ha a teljes kísérleti elrendezés a Tejútrendszer két átellenes szélén tartózkodó fotonokat tartalmaz, akkor is mindkét foton hatását figyelembe kell vennünk, még akkor is, ha ez a „kísérteties távolhatás” színre lépését vonja maga után. Hasonlóképpen, ha a valóságot a mérés elvégzése hozza létre, akkor nem kell mást tennünk ahhoz, hogy az Aspect-kísérlet eredményét ennek az értelmezésnek a fogalmaival megértsük, mint elfogadni azt a tényt, hogy a létrejött valóság nem szükségszerűen csak annak a közvetlen környezetnek a valósága, ahol a mérést végezzük, hanem a távoli vidékek valósága is, olyan helyeké, ahová a mérés során fellépő fényjeleknek még nem volt idejük eljutni.

Másik lehetőségként a világ „valóságosan valóságos” is lehet, abban az értelemben, ahogyan azt David Bohm és követői javasolják. Ha azonban ez így van, akkor Bohm szerint a világnak az osztatlan teljesség állapotában kell lennie, ezért ebben az esetben is, ha valahol megbökjük a világot, akkor ennek nagy távolságban is érződik a hatása, még hozzá azonnal és távolhatóan. Ebben és a hozzá kapcsolódó elképzelésekben, ahol a valóságos tulajdonságokkal rendelkező,

valóságos részecskékre egy a statisztikus törvényeknek engedelmeskedő vezérhullám gyakorol hatást, a pillanatszerű „kommunikáció” azáltal befolyásolja a kísérletek eredményét, hogy figyelembe veszi a Világegyetem többi részének az állapotát, ám ennek ellenére nem engedi meg az emberi megfigyelők között a hasznos információt tartalmazó jelek fénysebességnél gyorsabb, bárminemű továbbítását.

A sokvilág-értelmezés kissé különböző kategória, mert minden lehetséges kísérlet minden lehetséges eredményét egyaránt valóságosnak tekinti. Ám, amint említettem, az értelmezés magától értetődően távolhatást tartalmaz, minthogy az itt a Földön lejátszódó kvantumeseemény kimenetelének megválasztása azonnal a valóság sokszoros másolatainak megjelenését idézi elő, még a távoli galaxisokban is (és viszont, a távoli galaxisokban bekövetkező változások itt a Földön pillanatszerűen előidéznek a valóság megsokszorozódását). Az értelmezés mégis működik mint a kvantumvalóság ellentmondásmentes értelmezése.

John Bell a kvantumelmélet rivális értelmezéseit áttekintve, a következőképpen mutatja be a helyzetet:

Milyen mértékben tekinthetők ezek a lehetséges világok csupán kitalációknak? Olyanok, mint az irodalmi fikciók, ahol szabadon szárnyalhat az emberi elme. Az elméleti fizikában néha a felfedező kezdettől fogva tudja, hogy munkája csak fikció, például amikor egy egyszerűsített világgal foglalkozik, ahol a tér három dimenziója helyett csak egyet vagy kettőt használ. Gyakrabban csak később derül ki, hogy az elméletbe fikció keveredett, amikor a hipotézis hibásnak bizonyul. Ha az elméleti fizikus komolyan végzi a munkáját, és nem él szándékosan valamilyen egyszerűsített modellel, akkor gondolkodásmódja abban különbözik a regényíróétól, hogy a történet talán még igaznak is bizonyulhat.⁹³

Ezek a remények azonban alaptalanok. Minden modell szándékosan egyszerűsített, választásunktól függően, hogy melyik szabadsági fokot akarjuk a valósághoz kapaszkodónak használni. Továbbá minden, a közvetlen érzékelésünk határain túli modell ugyancsak fikció, az emberi elme szabadon született terméke. Szabadon dönthetjük el, hogy a kvantummechanika lehetséges értelmezései közül melyik a legszimpatikusabb a számunkra, vagy akár mindegyiket el is vethetjük, vagy ha úgy tetszik, megvásárolhatjuk az egész csomagot és aszerint váltogathatjuk a használt értelmezéseket, hogy éppen milyen kedvünk van, vagy a hét milyen napján dolgozunk, vagy egyéb szeszélyünknek engedhetünk. A valóság jelentős mértékben olyan, amilyennek akarjuk, hogy legyen.

Ennek ellenére csaknem mindenki tudni akarja „a választ”. A valóban valóságos modell keresése ösztönzi az elméleti fizikusokat, míg másokat viszont arra készítet, hogy filozófiát tanuljanak vagy valamelyik vallás követőivé váljanak. Én magam is éreztem ezt a vágyódást, bár elmém logikusan gondolkodó fele azt diktálja, hogy a keresés nem fog eredményre vezetni, legfeljebb abban reménykedhetünk, hogy találunk egy korunk számára megfelelő,

93 Bell: *Speakable and Unspeakable*, 194-195. oldal.

ellentmondásmentes mítoszt. Mindennek ellenére nem áll szándékomban elhagyni az olvasót anélkül, hogy elárulnám, mit tartok jelenleg a legjobb ajánlatnak a kvantumvalóságok piacán. Azt az értelmezést fogom bemutatni, amelyik világosan az előtérbe helyezi a távolhatás kérdését, és amely ugyanakkor olyan analógiákat és hasonlatokat nyújt, amelyek véleményem szerint meg fogják változtatni a fizikusok gondolkodásmódját a világról.

Doing Physics című könyvében Martin Krieger számos analógiát említ, amelyek hasznosak, ha meg akarjuk érteni, mivel is foglalkoznak a fizikusok. Tárgyalásában helyet kap a gyár a munkásaival, a gazdaság, a jól ismert óraműmodellek, sőt a rokonsági kapcsolatok is. Azonban azt is kijelenti (xix. oldal), hogy „más, fontos analógiák, mint például az evolúcióra és az élő szervezetekre vonatkozók sokkal kisebb szerepet játszanak a fizikában”.

Azt hiszem, történelmi tévedés volt az, amelyet éppen most helyesbítünk. Amint az In the Beginning című könyvemben részletesen bemutattam, azáltal, hogy a csillagászok és a kozmológusok a különféle égitesteket, például a galaxisokat, sőt magát az egész Világegyetemet úgy kezelik, mintha élő szervezetek lennének, újszerű bepillantást nyújtanak a világ természetébe, eredetének és végső sorsának kérdésébe. Az élőlények működésére vonatkozó alapvető fogalmak is elő fognak bukkanni a számomra legszimpatikusabb kvantummechanikai fikcióban, az úgynevezett tranzakciós értelmezésben. Nem állítom, hogy ez több pusztán kitalációnál; minden tudományos modell egy olyan novellára hasonlít, amelyiket elolvasva az az érzésünk támad, mintha értenénk, miről is van szó, anélkül, hogy szükségszerűen tartalmazzák a Világegyetemre vonatkozó kérdéseinkre a végső válaszokat. Ha azonban szeretnének egy olyan történetet elolvasni, amelyikben jelenleg hihetnek, és amelyiket valószínűleg csak nagy sokára fognak egy még jobb (vagy egyszerűen csak divatosabb) elképzeléssel helyettesíteni, akkor a tranzakciós értelmezést ajánlanám a szíves figyelmükbe. Eljött az idő, amikor szint kell vallanom, és le kell szögezmem az álláspontomat, mert most találkozunk újra azokkal az olvasókkal, akik az Előszó óta minden fejezetet átugrottak. Nekik is be akarom mutatni a valóságnak azt a változatát, amelyik a kvantumrejtélyek minden rejtélyét eltünteti.

Epilógus

A megoldás - korunk mítosza

A legfontosabb probléma, amelyet meg kell magyaráznunk, ha meg akarjuk magunkat győzni arról, hogy értjük a kvantumvilág rejtélyeit, Schrödinger kiscicáinak történetébe sűrítendő össze, amelyet az Előszóban ismertettem. Emlékezzünk vissza, hogy a kísérletet oly módon állítjuk össze, hogy a két kiscica a térben nagyon távol kerüljön egymástól, ám mindketten egy 50-50%-os valószínűségi hullám hatása alatt állnak. Ez a valószínűségi hullám egy elektron

hullámfüggvényének csak a két űrhajó egyikében bekövetkező összeomlásával és ezáltal a részecske „valóságossá” válásával van kapcsolatban. Abban a pillanatban, amikor a kapszulák egyikét kinyitjuk, és egy intelligens megfigyelő megállapítja, hogy ott van-e az elektron, vagy nincs ott, a valószínűségi hullám összeomlik, és a kiscica sorsa egyszer és mindenkorra eldőlt - ráadásul nemcsak a vizsgált dobozba zárt kiscicáé, hanem ezzel egyidejűleg a másik, az éppen akkor a Világegyetem túlsó részén lévő dobozba zárt másik kismacskáé is.

Végül is ez a két kismacska közötti kapcsolat standard koppenhágai értelmezés szerinti változata. Teljesen mindegy, hogy a kvantummechanika melyik értelmezését tartjuk a legszimpatikusabbnak, az Aspect-kísérlet és a Bell-egyenlőtlenség azt mutatja, hogy ha két kvantummechanikai képződmény összezsugorodik, akkor valóban úgy viselkednek, mintha egyetlen, Einstein „zavaros távolhatásának” befolyása alatt álló rendszer részei lennének. Az egész több, mint a részei összege, az egészet alkotó részek pedig visszacsatolásokkal kapcsolódnak egymáshoz, ezek a visszacsatolódások azonban úgy tűnnek, mintha pillanatszerűen működnének.

Ez az a pont, ahol elkezdhetünk felépíteni egy gyümölcsöző analógiát az élő rendszerekkel. Az élő rendszer, mint például a saját testünk, természetesen több, mint részei egyszerű összege. Az emberi test sejtek milliárdokból épül fel, ám olyan dolgok elvégzésére is képes, amelyet megfelelő számú sejt halmaza soha nem tudna megcsinálni. A sejtek a maguk módján ugyancsak élnek, hiszen olyasmire képesek, amire az általuk tartalmazott elemek egyszerű halmaza nem képes. Az élő sejtek és az élő szervezetek egyaránt elsősorban azért képesek ilyen érdekes dolgok végrehajtására, mert léteznek az információt továbbító visszacsatolások - a sejt egyik részéből a másikba és a test egyik szervéből a másikba. Mélyebb szinten, a sejtek belsejében ezek a visszacsatolások kémiai üzenetközvetítőket alkalmaznak, amelyek nyersanyagokat juttatnak el a megfelelő helyre, ahol azután felépítik belőlük az élet bonyolult molekuláit. Az emberi szervezet egészének szintjén minden egyes rutinszerű mozdulat ilyen visszacsatolásokon alapul. Amikor például az ujjaimmal megfelelő sorrendben lenyomom a számítógépem billentyűit, hogy létrejöjjön ez a mondat, akkor a visszacsatolásoknak köszönhetően az agyam folyamatosan információt gyűjt az érzékszerveimből, például a látó- és tapintószerveimből, majd ezen információk alapján szükség esetén módosítani tudja a test viselkedését (példánkban meghatározza, merrefelé kell a következő lépésben elmozdulni az ujjainknak).

Ez valódi visszacsatolás, ténylegesen két irányban végbemenő folyamat, nem egyszerűen csak az agyból az ujjak felé küldött utasítás, amely közli az ujjakkal, merre mozduljanak el. Az egész rendszer részt vesz annak megállapításában, hol vannak az egyes ujjak, milyen gyorsan (és milyen irányban) mozognak, ellenőrzi, hogy a megfelelő nagyságú nyomást gyakorolják-e a billentyűkre, ha kell, visszamennek, hogy kijavítsanak egy melléütést (nálam ez elég gyakran előfordul), és így tovább. Még a vakon író gépiró is hozzáigazítja az ujjai tényleges elmozdulását a visszacsatolások eredményeképpen érkező információkhoz, ugyanúgy, ahogyan kerékpározás közben is a visszacsatolásoknak köszönhetően tudjuk azokat az automatikus, apró korrekciókat végrehajtani, amelyek

eredményeképpen egyensúlyunkat megtartva a nyeregben maradunk. Ha semmit sem tudunk ezeknek a visszacsatolásoknak a működéséről, és elképzelésünk sincs arról, hogy a test különböző részeit milyen kommunikációs rendszer kapcsolja össze egymással, akkor csodálatosnak tűnhet, hogy a kezeim végén elhelyezkedő, hosszúkás, csontból és húsból álló szervek értelmes üzenetet varázsolnak elő a billentyűzetből. Ha nem tételezünk fel valamilyen kommunikációt és visszacsatolást, akkor ugyanilyen csodának tűnhet az Aspect-kísérlet eredménye, miszerint összefüggés áll fenn két, az atomból ellentétes irányban kirepülő foton polarizációs állapota között. Az egyetlen, óriási különbség, az akadály, amelyet le kell győznünk, a visszacsatolás pillanatszerű természete a kvantumvilágban.

Ezt azonban magának a fénynek a természetével magyarázzuk, akár a relativitáselmélet összefüggésében, akár pedig az elektrodinamika kvantumtermészetének megfelelő szemlélettel vizsgáljuk a kérdést. Ez a szemlélet az elektromágneses sugárzások viszonylag kevésbé ismert, Wheeler-Feynman-féle modellje - amely modell egyúttal meglepően jó betekintést nyújt a gravitáció működésébe is.

Létrehozzuk a tömeg legnagyobb részét

Feynman kevésbé ismert, több mint fél évszázaddal ezelőtti meglátása szerint az elektromágneses sugárzás viselkedése és a részecskékkel való kölcsönhatásának módja megmagyarázható, ha komolyan vesszük azt a tényt, hogy az elektromágneses hullámokat a tó felszínén tovaterjedő fodrozódásokhoz hasonlóan tárgyaló Maxwell-egyenleteknek két megoldása van. A megoldások egyik csoportja eleget tesz a „józan ész” elvárásainak, ez a gyorsuló elektromos töltésből kiinduló, attól távolodó és az időben előre felé haladó hullámokat írja le. Ezek a hullámok ugyanúgy terjednek kifelé, mint a vízhullámok, amelyek abból a pontból indulnak ki, ahol a kő beleesett a tóba. A mind a mai napig általában figyelmen kívül hagyott második megoldás az időben visszafelé haladó, és a töltött részecske felé tartó hullámokat írja le. Olyan ez, mintha a vízhullámok a tó partjánál indulnának, és a tó közepén egy pontban találkoznának. Amint a második fejezetben megmutattam, ha megengedjük, hogy a hullámok mindkét csoportja a Világegyetem összes töltött részecskéjével kölcsönhatásra lépjen, akkor a bonyolultság legnagyobb része kiejti egymást, és csak a józan észnek megfelelő, jól ismert (úgynevezett „retardált”) hullámok maradnak meg és szállítják az elektromágneses hatást egyik töltött részecskétől a másikig. Ám mindezen kölcsönhatások eredményeképpen minden egyes töltött részecske - köztük minden egyes elektron - pillanatszerűen (azonnal) tisztában van saját helyzetével a Világegyetem összes többi töltött részecskéjéhez képest. Az időben visszafelé haladó (úgynevezett „avanzsált”) hullámok egyetlen érzékelhető hatása az, hogy olyan visszacsatolást hoznak létre, amely az összes töltött részecskét a teljes elektromágneses hálózat elválaszthatatlan, szerves részévé teszi. Csípjünk csak nyakon egy elektront itt, a földi laboratóriumunkban, és akkor elvben minden egyes töltött részecske - mondjuk akár a kétmillió fényév távolságban lévő Androméda-ködben is - azonnal tudni fogja, mi történt, jöllehet

az elektron el-csípésekor itt a Földön keletkező bármely retardált hullám csak több mint kétmillió év múlva fogja elérni az Andromeda-ködöt.

Még a Wheeler-Feynman-féle abszorberelmélet hívei sem mennek azonban annál tovább, hogy ezt így kifejtik. Az elmélet hagyományos változata szerint (már amennyire ezzel az elmélettel kapcsolatban egyáltalán megengedhető a „hagyományos”-szó használata) az itt, a Földön lévő elektron „tudja, hol van” a bárhol másutt tartózkodó töltött részecskékhez képest, beleértve természetesen az Androméda-ködben található részecskéket is. Az azonban a visszacsatolás lényegéből adódik, hogy mindkét irányban működik. Ha a mi elektronunk tudja, hol van az Androméda-köd, akkor egész bizonyosak lehetünk abban, hogy az Androméda-köd is tudja, hol van a mi elektronunk. A visszacsatolás eredményeképpen - vagyis annak a ténynek a következtében, hogy az elektronunkat nem tekinthetjük elszigetelt, magányos részecskének, hanem a Világegyetemet kitöltő, holisztikus, elektromágneses háló részének kell tartanunk - az elektron ellenáll mindenféle próbálkozásunknak, amikor félre akarjuk lökni, még hozzá a távoli galaxisokban található töltött részecskék sokaságának hatása miatt, noha semmiféle információt hordozó jel nem terjedhet a galaxisok között a fénysebességnél gyorsabban.

A töltött részecskék által érzékelt sugárzási ellenállásra adott fenti magyarázat egy másik, korábban már említett, a fizikusokat régóta izgató rejtélyre emlékeztet. Miért állnak ellent a közönséges anyagdarabok a mozgásnak, és honnan tudják, mekkora ellenállást kell kifejteniük, ha odébb lökjük őket? Honnan ered maga a tehetetlenség?

Úgy tűnik, Galilei ismerhette fel elsőként, hogy nem a testek mozgási sebessége, hanem gyorsulásuk utal a testre ható erő nagyságára. A Földön mindig jelen van a súrlódás - a külső erők egyike -, amely minden test mozgását lassítja, hacsak nem tartjuk mozgásban a testet. Ha viszont nem lépne fel a súrlódás, akkor a testek örökké egyenes vonalú, egyenletes mozgást végeznének, hacsak valamilyen húzó vagy toló erő nem hatna rájuk.

Ez a megállapítás lett a mechanika newtoni törvényeinek egyik sarkpontja. Az üres térben a testek (valamilyen abszolút nyugvó rendszerhez képest) állandó sebességgel mozognak, érvelt Newton, hacsak külső erők nem gyorsítják. Adott tömegű test esetén a meghatározott erő által létrehozott gyorsulás az erő és a tömeg hányadosával egyenlő.

A felfedezés egyik érdekes jellegzetessége, hogy a számítások során felbukkanó tömeg azonos azzal a tömeggel, amely a gravitációs kölcsönhatásban is szerephez jut. Egyáltalán nem nyilvánvaló, hogy ennek így kell lennie. A gravitációban szereplő, úgynevezett súlyos tömeg annak az erőnek a nagyságát határozza meg, amelyik a testből kiindulva az egész Világegyetemre kiterjed, és vonzást gyakorol minden más testre. Ezzel szemben az úgynevezett tehetetlen tömeg annak a válasznak a nagyságát határozza meg, amellyel a test a külső erők hatására reagál - ahol ez a külső erő nemcsak a gravitáció lehet, hanem bármilyen más erő is. Mégis, a kétféle tömeg egyenlő egymással. A testeket

alkotó „anyag mennyisége” nemcsak a test által a külvilágra kifejtett hatást határozza meg, hanem azt is, ahogyan a test a külvilágból érkező hatásokra reagál.⁹⁴ Úgy néz ki, mintha itt is valamilyen visszacsatolás működne, egy kétirányú folyamat, amely minden egyes testet összekapcsol a Világegyetem egészével. Ám egészen a közelmúltig senkinek sem volt egyértelmű elképzelése ennek a visszacsatolásnak a működéséről.

Maga Newton leírt egy világos kísérletet, amely arra enged következtetni, hogy valóban létezik a Világegyetemben egy kitüntetett vonatkoztatási rendszer. Később a filozófusok azt állították, hogy ez a kísérlet pontosan megmutatja, mi az, ami az abszolút nyugalmat definiálja. Newton 1686-ban a Princípiában leírta, mi történik, ha egy vödör vizet felakasztunk egy kötéltre, majd a kötelet szorosan felcsavarjuk és elengedjük. Ahogy a kötélt kicsavarodik, a vödör természetesen forogni kezd. Eleinte a vödörben lévő víz felszíne vízszintes, ám a forgó vödör által kifejtett súrlódás fokozatosan forgásba hozza a vizet. A forgó víz felszíne konkáv alakot vesz fel, mert a „centrifugális erő” a vödör fala felé taszítja a vízrészecskéket. Ha ekkor erősen megragadjuk a vödröt, és megállítjuk a forgását, a víz egy ideig tovább forog, és természetesen megtartja konkáv felületét. Ahogy azonban a víz forgása lassul, úgy simul ki egyre inkább, majd amikor teljesen leáll a forgása, a felszín tökéletesen vízszintes lesz.

Newton rámutatott, hogy a vízfelszín konkáv alakja azt jelzi, hogy a víz „tudja”, hogy forog. De mihez képest forog? A víz és a vödör egymáshoz képest végzett forgása nyilvánvalóan nem játszik szerepet. Ha a vödör és a víz egyaránt nyugalomban van, akkor a vízfelszín sík. Ha a vödör forog, a víz azonban nem, a vízfelszín ugyancsak sík, noha a vödör és a víz egymáshoz képest forog. Ha a víz forog, de a vödör nem, akkor ugyancsak jelen van a relatív forgás, ám a vízfelszín mégis konkáv. Végül, ha a víz és a vödör egyaránt forog, akkor nincs relatív mozgás a vödör és a víz között, a felület pedig konkáv. Eszerint tehát, érvelt Newton, a víz „tudja”, hogy az abszolút térben forog-e vagy sem.

A XVIII. században a filozófus Geroge Berkeley más magyarázatot adott a jelenségre. Érvelése szerint minden mozgást valamilyen megfogható dologhoz kell viszonyítani. Rámutatott, hogy a híres vödrös kísérletben csak egy körülmény tűnik fontosnak, nevezetesen az, hogy milyen mozgást végez a víz az abban az időben ismert legtávolabbi testekhez, vagyis az állócsillagokhoz képest. Ma már természetesen tudjuk, hogy a csillagok viszonylag közeli szomszédaink a mindenségben, és túl a Tejútrendszer határain további galaxisok milliói találhatók. Berkeley megállapítása azonban ennek ellenére ma is érvényes. A vízfelszín sík, ha a víz a távoli galaxisokhoz képest nem forog, ezzel szemben görbült felületet látunk, ha a víz forog a távoli galaxisokhoz viszonyítva. Emellett úgy tűnik, hogy a

94 Ne tévesszen meg senkit az a tény, hogy ugyanannak a testnek a súlya a Holdon kisebb, mint a Földön. Nem maga a test változik meg, egyszerűen a Hold felszínén a gravitáció gyengébb, mint a Föld felszínén. A Hold felszínén elhelyezett testhez viszonyítva tehát a külső erő kisebb, márpedig a test válasza a külső erőhatásra éppen ezzel a kisebb külső erővel arányos, ennek következtében „nyom” kevesebbet a test a Holdon.

gyorsulást is a távoli galaxisokhoz képest kell meghatározni, vagyis az anyag világegyetembeli átlagos eloszlásához képest. Olyan ez, mint amikor valamit odébb akarunk tolni, és a test figyelembe veszi saját helyzetét a Világegyetemben lévő összes anyaghoz képest, és ennek megfelelően reagál. A testet valahogy a gravitáció tartja a helyén, ezért azonos egymással a súlyos és a tehetetlen tömeg.

Az elgondolást, amely a tehetetlenséget valójában az anyagi testeknek a Világegyetem egészére adott válaszaként értelmezi, általában Mach-elvnek nevezik. Az elv Ernst Mach, XIX. századi osztrák fizikusról kapta a nevét, aki hosszasan és elmélyülten gondolkozott a tehetetlenség természetéről, jóllehet nevét a sebességet a hang sebességéhez képest kifejező Mach-szám tette inkább halhatatlanná.

Amint említettem, Mach elképzelései, amelyek lényegében Berkeley gondolatainak kiterjesztései voltak, jelentős hatást gyakoroltak Einsteinre. Einstein érvelése szerint a súlyos és a tehetetlen tömeg azonossága azért áll fenn, mert a tehetetlenségi erők valójában gravitációs eredetűek. Einstein megpróbálta a Mach-elvet - vagyis az egész Világegyetem minden súlyos tömegre ható visszacsatolását - az általános relativitáselméletébe is beépíteni. Meglehetősen egyszerű az elképzelést naiv módon megindokolni. Az összes távoli galaxis (és minden más égitest) együttes tömege mindenre a Földön (és persze másutt is) gravitációs hatást fejt ki, beleértve például az asztalom sarkán tornyosuló floppylemezeket. Amikor megpróbálom elvenni valamelyik lemezt, az ehhez szükséges erő kifejtés nagysága attól függ, milyen erősen tartja a helyén a Világegyetem anyaga az illető lemezt.

Mindezt azonban sokkal nehezebb szigorú, tudományos alapokra helyezni. Honnan „tudja” a lemez egyetlen szempillantás alatt, hogy pontosan mekkora ellenállást kell mutatnia az őt megmozdítani akaró igyekezetem ellenében? Az egyik szimpatikus lehetőség (legalábbis a naiv kép értelmében) az lehet, hogy amikor taszigáljuk a testet, és ezáltal megváltoztatjuk a mozgásállapotát, akkor valamiféle gravitációs hullámokat küldünk ki a Világegyetembe, amire valamilyen visszhang érkezik. Ez a visszhang a megzavart tárgyra összpontosul, így akarván fenntartani a korábbi állapotot. Ha azonban a jelek, beleértve a gravitációs hullámokat is, legfeljebb fénysebességgel terjedhetnek, akkor szinte egy örökkévalóságba telne, mire a visszhang visszaérkezne, és a lemez el tudná dönteni, miként is kellene reagálnia a lökdösésre.

Egészen más azonban a helyzet, ha a gravitáció leírásába valamiképpen beépítjük az időben szimmetrikus, Wheeler-Feynman-féle abszorberelméletet, aminek értelmében a visszacsatolást képviselő gravitációs hullámok egy része az időben visszafelé halad. Minthogy az elektromágneses sugárzások Wheeler-Feynman-elmélete csak mintegy 30 évvel később született meg, mint Einstein gravitációelmélete, és még akkor sem vette senki teljesen komolyan, ezért még sokat kellett várni, mire sikerült a Mach-elv által felvetett rejtély megoldását szilárd matematikai alapokra helyezni.

Mióta Einstein megalkotta az általános relativitáselméletet, sokan tanakodtak

azon, hogy az elmélet megfelelő módon tartalmazza-e a Mach-elvet vagy nem. Az elmélet bizonyos lépéseket kétségtelenül tesz a Mach-elv magába olvasztása irányába, mert a tér bármely pontjában elhelyezkedő test viselkedése a téridő adott helyen fennálló görbületének nagyságától függ, amit viszont a Világegyetem egész anyagának együttes gravitációs hatása határoz meg. Mégis úgy tűnik, hogy ez felveti a kérdést, milyen gyorsan jutnak el a téridő görbületét meghatározó „jelek” egyik helyről a másikra. Minthogy a távoli galaxisok maguk is mozognak, hatásuk folyamatosan változik. Vajon ezeknek a változásoknak a hatása fénysebességgel terjed, vagy pillanatszerűen érvényesül? És ha azonnali a hatás, akkor miképpen működik?

A vita érdekes szála, hogy az Einstein-egyenletek csak akkor mutatják megfelelő mértékben a Mach-féle hatást, ha a Világegyetem elegendő anyagot tartalmaz ahhoz, hogy a téridő szerkezete gravitációsan önmagába záródjék. Egy „nyílt”, minden irányban a végtelenig terjedő Világegyetemben az egyenletek véges nagyságú tehetetlenség esetén soha nem hozhatók egyensúlyba. Ezt érvként szokták felhasználni azzal az állítással szemben, mely szerint az általános relativitáselmélet magában foglalja a Mach-elvet, ugyanis korábban azt gondoltuk, hogy a Világegyetem „nyílt” szerkezetű. Azonban, mint a második fejezetben láttuk, a helyzet teljesen megváltozott, és ma úgy tűnik, mintha meggyőző bizonyítékok szólnának amellett, hogy a Világegyetem valójában „zárt”. Ez természetesen még egy érv amellett, hogy miért veszik mostanában komolyabban a Wheeler-Feynman-féle abszorberelméletet.

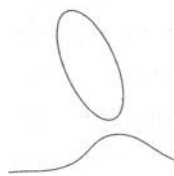
Shu-Yuan Chu a Kaliforniai Egyetemen 1993-ban publikált egy cikket, ami rávilágít, merről is fúj a szél.⁹⁵ Chu korábban a Bell-egyenlőtlenséget a Wheeler-Feynman-elmélet egy variációjának szempontjából vizsgálta, ezért levélben megkérdeztem tőle, min dolgozott még ezen kívül. Kiderült, hogy egyebek között azzal is foglalkozott, miként lehet gravitáció jelenlétében megalkotni a kvantummechanikát. Szépen kombinálta a legújabb részecskefizikai elképzeléseket az időben szimmetrikus Wheeler-Feynman-moddal. Így kimutatta, honnan ered maga a gravitáció, miközben mellesleg a tehetetlenségre is magyarázatot adott. E sorok megírásáig (1994 márciusában) ez a munka még csak a Kaliforniai Egyetem UCR-HEP-T117 számú „preprintje” formájában látott napvilágot. Ebben a szerző olyan tömören leírja munkája eredményeit, ahogyan soha egyetlen könyv sem adhat bepillantást a legújabb kutatási eredményekbe. A szerző által összeállított elegáns csomag olyan sok különféle elképzelést érint, hogy semmiképpen sem mehetünk el említés nélkül a munkája mellett.

A gravitáció összehúrozása

Mindenekelőtt rövid kitérőt kell tennünk a történet részecskefizikai vége irányába. Az 1990-es években a részecskefizikusok már nem tudták tovább folytatni az anyag legrejtettebb, belső zugaiba, a részecskék szintjén az elektronok és a

95 Physical Review Letters 71 (1993), 2847. oldal.

kvarkok világába vezető utazásukat. A történelem újra megismételte önmagát, és megint olyan időszak köszöntött be, amikor szét akarták szedni az „alapvető” részecskéket, hogy megnézzék, mi rejtőzik bennük. Az 1980-as évek közepén egyes részecskefizikusoknak sok fejtörést okozott az a felfedezés, amely szerint egyes részecskék, például az elektronok és a kvarkok tulajdonságai jól megmagyarázhatók lennének, ha feltételeznénk, hogy kisebb, húroknak nevezett képződményekből épülnek fel. Amint a nevük is jelzi, ezek az „új” képződmények különböznek a jól ismert biliárdgolyó-modell részecskéitől, hiszen hosszúságuk van - vagyis egy dimenzióban kiterjedtek, a szó szoros értelmében parányi húrra hasonlítanak.



25. ábra A hurok két formában fordulhatnak elő - zárt hurkok vagy nyílt végűek lehetnek.

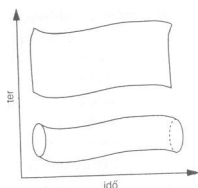
A „parányi” azonban itt a leglényegesebb szó. A jellegzetes húr mindössze 10^{-35} méter hosszú, eszerint tehát 10^{20} ilyen húrt kellene egymás mellé helyeznünk, hogy megkapjuk egy proton átmérőjét. Nincsenek közvetlen kísérleti bizonyítékaink a hurok létezésére. Az ilyen léptékű kölcsönhatások kimutatására alkalmas kísérletekhez több energiára lenne szükség, mint amennyit a Földön elképzelhető legnagyobb részecskegyorsító nyújtani tudna. Létezésük lehetősége azonban a részecskék világában működő kölcsönhatásokat leíró, jól megalapozott elméletén nyugszik. Ez az elmélet a kvantumelektrodinamika és a kvantumszíndinamika östípusaiból származik, és jól közelít a mindenség elmélete felé.

Nos, korábban már megmutattam, hogy egyetlen elméletünk vagy modellünk sem mondja el „az egyetlen igazságot” a részecskék világáról, jóllehet mindegyikük többé-kevésbé sikeresen vázol egy felfogható képet, miközben a modellek előrejelzések készítésére is alkalmasak. Ezen az alapon a húrelmélet valóban nagyon sikeresnek mondható. Bár soha senki nem látott még ilyen húrt, de még csak a részecskegyorsítókkal végzett kísérletekben sem sikerült a nyomukat kimutatni, ennek ellenére a részecskék tulajdonságai könnyen megmagyarázhatók az elmélet keretein belül. A töltést például a hurok végeihez „kötöttnek” képzeljük el, a részecskék közötti kölcsönhatások pedig a hurok közötti ütközésekkel, a hurok egyesülésével vagy szétválásával magyarázhatóak. Még az is kiderül, hogy a rezgő hurokból létrejövő zárt hurkok tulajdonságai olyanok, hogy automatikusan gravitonokként, vagyis a gravitációt közvetítő részecskékként működnek, hasonlóan ahhoz, amint a fotonok az elektromágneses erőket közvetítik. Az egész csomag ellentmondásmentes, logikus és (matematikai lehetőségeit illetően) éppolyan jó magyarázat a világ működésére, mint bármelyik másik hipotézis. A dolog egyetlen hátulütője, hogy semmilyen módon nem tudjuk

rá alkalmazni a kísérleti ellenőrizhetőség Newton által felállított kritériumát. Ez azonban nem tartotta vissza az elméleti fizikusokat attól, hogy az elméletet felhasználva magyarázatot adjanak a Világegyetem megfigyelt tulajdonságaira - pontosan úgy, ahogyan azt Chu is tette.

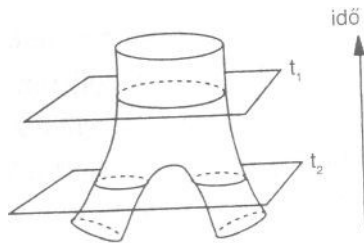
A gravitációra vonatkozó vizsgálatai egy nagyobb lélegzetű próbálkozás részét képezik, amelyben megpróbál ezen a szinten magyarázatot adni a kölcsönhatásokra. Ehhez a Wheeler-Feynman-féle megközelítésmódon alapuló, időben szimmetrikus leírást hív segítségül. Munkája során kiküszöböli a „mező” fogalmát (például az elektromágneses teret és a gravitációs mezőt), ezeket nem tekinti független létezőknek. A részecskék időben szimmetrikus módon lépnek egymással kölcsönhatásba, folytonos visszacsatolás mellett avanszált és retardált „üzeneteket” váltanak egymással. Amire pedig eddig folytonos mezőként gondoltunk, például a gravitációra, arról kiderül, hogy az anyag apró darabjai közötti kölcsönhatások átlagolódásából épül fel. A folytonos gravitációs mező olyan léptékben bukkan elő ebből az átlagolódási folyamatból, amekkorák a folyamatban részt vevő részecskék - márpedig ha ezek a részecskék valójában azok a parányi húrdarabkák, amelyekből 10^{20} darab teszi ki egy proton átmérőjét, akkor ez azt jelenti, hogy a gravitáció még a proton mérettartományában is nagyon simának és folytonosnak látszik. „A téridő görbülete”, tartja Chu, „csupán a húrok lepleivel átszőtt mozgások mintázatának tükröződése”.

E megközelítés egyik következményeképpen a részecskék mozgásának a klasszikus pályák Newton-féle fogalmával történő leírása a részecskék viselkedésének valamiféle statisztikai átlagolásából bukkan elő. „A húrok kis léptékű rezgéseket végeznek részecskeszerű pályáik körül... miután az erős rezgéseket már kiátlagoltuk.” Itt már visszaköszönnék a Feynman-féle pályaintegrálok (az összegzés a történetekre), valamint Ilya Prigogine termodinamikai indíttatású, statisztikus megközelítése a részecskevilág magyarázatára. Nem alkalmas a pillanat arra, hogy elmerüljünk a részletekben - ehhez legalább még egy ugyanekkora könyvre lenne szükség -, annyit azonban leszögezhetünk, hogy mind Prigogine, mind pedig Chu a valóság olyan leírását alkotta meg, ahol a statisztikáé az elsődleges szerep, és a klasszikus részecskepályák csak a statisztikából bukkannak elő. Chu szavaival, a klasszikus és a kvantumvilágban egyaránt „a mechanika alapjai a statisztikára látszanak épülni ... a mechanikát kell a statisztikából levezetni, nem pedig fordítva”.



26. ábra A téridőben mozgó, nyílt végű húrok „világlepleket” súrolnak; a téridőben mozgó, zárt hurkot alkotó húrok viszont „világcsöveket”.

A termodinamikával nyilvánvaló a kapcsolat. A termodinamika kulcsfontosságú fogalma az entrópia, ami lényegében annak a mértéke, hogy milyen közel van egy bizonyos rendszer az egyensúlyi állapothoz. Chu leírása értelmében a maximális entrópiának megfelelő egyensúlyi állapotban Einstein mozgásegyenletei a részecskepályák helytálló leírását adják. Az eredeti Wheeler-Feynman-elmélet (és a Mach-elvet az általános relativitáselméletbe beépíteni szándékozó próbálkozások) szerint azonban a jelen húrjai által a jövő felé kibocsátott minden sugárzásnak maradéktalanul el kell nyelődnie - más szavakkal tehát a Világegyetemnek zártnak kell lennie. Egy 1993-ban nekem írott levelében Chu tömören összefoglalja a helyzetet és az alábbi következtetésre jut: „A klasszikus mechanika az egyensúlyi állapotokat írja le (ezért nincsenek jelen statisztikus kijelentések a klasszikus mechanikában); a kvantummechanika a fluktuációkkal foglalkozik; a pályaintegrálok formalizmusa pedig az óriási számú húr egész rendszerre történő összegzéséből adódik.”

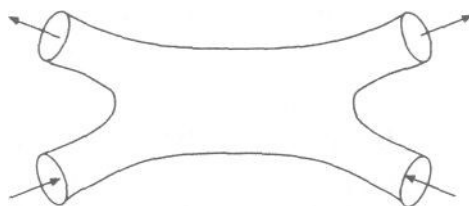


27. ábra Két, a téridőben mozgó húr-hurok egymással egyesülve „téridő-nadrágot” alkot.

Tartogatunk azonban még egy kis meglepetést mindazoknak, akik figyelemmel kísérték az elmúlt évek kozmológiai vitáit. A Világegyetem Einstein-féle leírása, vagyis az általános relativitáselmélet egyenletei tartalmazznak egy kozmológiai állandónak nevezett számot, amely immár több mint 70 éve egyfolytában kínos helyzetbe hozza a csillagászokat. Nincs lehetőség arra, hogy az Einstein-egyenletek alapján kiszámítsuk az értékét, mégis úgy tűnik, mintha nullától különböző értéke lenne. Ugyanakkor a Világegyetem nagyléptékű tágulására vonatkozó megfigyelések arra utalnak, hogy értékének nagyon közel kell lennie a nullához. Mindamellet még a kozmológiai állandó kicsiny (nullától különböző) értékének is alapvető hatása lenne a Világegyetem tágulásának mikéntjére. A gravitáció Chu-féle leírása a hurok hosszánál sokkal nagyobb távolságok esetében pontosan megegyezik Einstein leírásával, az egyetlen különbség az, hogy Chunál egyáltalán nem fordul elő a kozmológiai állandó.

Visszatérve a Bell-egyenlőtlenséghez, a problémát az jelenti, hogy a kísérletek tanúsága szerint pillanatszerű korreláció működik a távoli részecskék között. Chu azonban a Physical Review Letters-beli cikkében erről így vélekedik: „A térben egymástól távoli két részecske közötti, pillanatszerű korrelációt létrehozhatja egy harmadik részecske, amely a két részecske közül az egyikkel avanszált, a másikkal pedig retardált kölcsönhatásban áll.”

Ezért próbálta meg a Wheeler-Feynman-féle megközelítést beépíteni előbb a kvantummechanika leírásába, majd a húrelmélet segítségével a gravitáció leírásába is. Abban az időben azonban nem vette észre, hogy ennek a megközelítésnek a filozófiai alapjait a seattle-i Washington Egyetemen John Cramer már korábban, az 1980-as években publikált, de szinte teljesen észrevétlen maradt cikksorozatában lefektette. A kvantummechanika Cramer-féle „tranzakciós értelmezése” pontosan ugyanezt a megközelítést használja. A hasonló elképzeléseket Chu sikeresen alkalmazza a húrelméletre és a gravitációra, ami határozottan arra enged következtetni, hogy ez már a közeljövőben a fizika rendkívül termékeny területének fog bizonyulni. Amikor Cramer munkájáról beszélgettem vele, Chu így fogalmazott: „Ha tudtam volna, hogy az avanszált kölcsönhatásokat ezekben a vitákban már korábban elfogadták egyik lehetőségként, akkor természetesen sokkal kevésbé aggódtam volna a Wheeler-Feynman-féle, időben szimmetrikus elektrodinamika húrelméleti általánosítása miatt.”



28. ábra Két részecske kölcsönhatása a húrelmélet fogalmaival két világcső egyesüléseként majd szétválásaként értelmezhető. Az efféle diagramok sokkal bonyolultabbak is lehetnek, a hurok számos hurkot tartalmazhatnak, hasonlóan ahhoz, amilyen bonyodalmakkal az elektron mágneses momentumának kiszámításakor találtuk szembe magunkat (lásd a 13. ábrát).

Nos, legyünk készen arra, hogy minden aggodalmunkat félrelökjük, előttünk áll ugyanis, amire vágytunk: a világ kvantummechanikai szintű működésének az összes elérhető közül a legjobb értelmezése. Mindazok figyelmébe ajánljuk, akik egyetlen „választ” szeretnének kapni a Bell-egyenlőtlenség, az Aspect-kísérlet és Schrödinger kiscicáinak sorsa által felvetett rejtélyek mindegyikére.

A bonyolultság egyszerű arca

A Wheeler-Feynman-elmélet eredeti változatában - a szó szigorú értelmében - klasszikus elmélet volt, hiszen nem vette figyelembe a kvantummechanikai folyamatokat. Mindamellett, az 1960-as évekre a kutatók megállapították, hogy az egymást átfedő és egymással kölcsönható hullámok bonyolult rendszeréből csak két stabil állapot származtatható, az egyik az időben előre felé, a másik hátrafelé

halad. Egy ilyen rendszert végső soron vagy a retardált sugárzásnak kell uralnia (ez a helyzet a mi Világegyetemünkben), vagy az avanszált sugárzásnak (ez lenne a helyzet egy olyan világban, ahol az idő visszafelé múlik). Az 1970-es évek elején néhány kozmológus, akiket izgatott, miért kell egyáltalán a Világegyetemben az időnek irányítottnak lennie, kidolgozta a Wheeler-Feynman-elmélet egy olyan változatát, amelyik már a kvantummechanikával is számol. Tulajdonképpen kidolgozták a kvantumelektrodinamika Wheeler-Feynman-féle változatát. Fred Hoyle és Jayant Narlikar a pályaintegrálok módszerét használta, míg Paul Davies egy másik, S-mátrix elméletnek nevezett matematikai megközelítéssel próbálkozott. A megoldás matematikai részletei számunkra nem különösebben lényegesek; inkább arra figyeljünk, hogy minden esetben azt állapították meg, hogy a Wheeler-Feynman-féle abszorberelmélet átalakítható egy teljes egészében kvantummechanikai modellé.

A kozmológusok érdeklődését egyetlen ötlet keltette fel a kérdés iránt - ami tényleg nem több pusztán ötletnél. Eszerint az a körülmény, hogy a Világegyetemben a retardált hullámok az uralkodók, és ennek következtében az időnek meghatározott irányúnak kell lennie, azzal a ténnyel állhat összefüggésben, miszerint maga a Világegyetem is időbeli aszimmetriát mutat, hiszen története a múltban az Ősrobbanással kezdődött, és (valószínűleg) a Nagy Reccsként emlegetett összeomlással fog véget érni, valamikor a távoli jövőben. A Wheeler-Feynman-elmélet lehetőséget ad arra, hogy a részecskék itt és most „tudjanak” a Világegyetem múltbeli és jövőbeli állapotairól - ezek a „határfeltételek” választhatnak a kétféle hullám közül, és tehetik uralkodóvá a retardált hullámokat.

Mindez azonban eddig még csak az elektromágneses sugárzásra érvényes. Az óriási ugrást John Cramer tette meg, amikor ezeket az elképzeléseket kiterjesztette a kvantummechanika hullámegyenleteire - magára a Schrödinger-egyenletre, és a fotonokhoz hasonlóan fénysebességgel haladó valószínűségi hullámokat leíró egyenletekre. Eredményei 1986-ban egy minden részletre kiterjedő, áttekintő cikkben jelentek meg,⁹⁶ ám a dolgozatnak olyan csekély volt a hatása, hogy például amikor Chu 1993-ban kidolgozta a húrelméleten alapuló elképzelését, akkor addig még soha nem hallott Cramer értelmezéséről.

Ha az abszorberelméletet a kvantummechanikára akarjuk alkalmazni, akkor szükségünk van egy, a Maxwell-egyenletekhez hasonló egyenletre. Ennek két megoldása van, az egyiknek a jövő felé áramló, pozitív energiahullám felel meg, a másik viszont egy a múlt felé haladó, negatív energiahullámot jelent. Első pillanatban úgy tűnik, hogy Schrödinger híres hullámegyenlete nem felel meg a feltételeknek, mert csak egy irányba történő áramlást ír le, amelyet (magától értetődően) a múltból a jövő felé haladóként értelmezünk. Ám, amint azt minden fizikus megtanulta az egyetemen (majd a lehető leghamarabb elfelejtette), az egyenlet legszélesebb körben használt változata nem teljes. Amint azt már a kvantummechanika úttörői is felismerték, az egyenlet nem veszi figyelembe a

96 „The transactional interpretation of quantum mechanics”, *Previews of Modern Physics* 58 (1986), 647. oldal.

relativitáselmélet követelményeit. A legtöbb esetben ez nem számít, ezért van az, hogy a fizikushallgatók, sőt a kvantummechanikai kutatást folytató fizikusok legtöbbször is örömmel használja az egyenlet egyszerűbb változatát. A hullámeqyenlet teljes, a relativisztikus hatásokat megfelelően számításba vevő változata meglehetősen hasonló a Maxwell-egyenletekhez. Nevezetesen, az egyenlet megoldásainak két csoportja létezik - az egyik azonos az egyszerűsített Schrödinger-egyenlet megoldásával, a másik viszont valamiféle „tükörkép Schrödinger-egyenlet” megoldásának felel meg, amely szerint negatív energia áramlik a múlt felé.

Ez a kettősség a kvantummechanikával összefüggő valószínűségek kiszámításakor mutatkozik meg legvilágosabban. Egy kvantummechanikai rendszer tulajdonságait a gyakran „állapotvektornak” nevezett, matematikai kifejezéssel írjuk le (ez lényegében a hullámfüggvény más megnevezése), amely információt tartalmaz a kvantummechanikai képződmény állapotáról - megadja a rendszer helyét, impulzusát, energiáját és egyéb tulajdonságait (ahol a rendszer egyszerűen akár egy elektron hullámcsomagja is lehet). Általában ebben az állapotvektorban keverednek a közönséges („valós”) számok és a képzetes számok (amelyek -1 négyzetgyökét, az i -vel jelölt számot tartalmazzák). Az ilyen keverék számokat nyilvánvaló okok miatt komplex változóknak nevezzük; ezeket egy valós és egy képzetes rész összegeként (vagy különbségeként) írhatjuk fel. A valószínűségi számítások során meg kell állapítanunk, hogy (mondjuk) egy elektront milyen valószínűséggel találunk meg adott időben egy adott helyen. Ennek során szükségünk van az elektron meghatározott állapotának megfelelő állapotvektor négyzetének kiszámítására. Egy komplex változó négyzetének a kiszámítása azonban nem egyszerűen azt jelenti, hogy a számot meg kell szoroznunk önmagával, hanem képeznünk kell egy másik változót is, egy tükörkép-változatot, az úgynevezett komplex konjugáltat. Utóbbit úgy állítjuk elő, hogy a komplex szám képzetes részének az előjelét az ellenkezőjére változtatjuk, a $+$ helyett $-$ jelet írunk, és megfordítva. Ezután a két komplex számot össze kell szorozni, így kapjuk meg a keresett valószínűséget. Az olyan egyenletek esetében azonban, amelyek valamely rendszer időbeli változását írják le, a komplex konjugált képzése - a képzetes rész előjelének megváltoztatásával - az idő iránya megfordításának felel meg! A Max Born által 1926-ban felírt, alapvető valószínűségi egyenlet maga is explicit utalást tartalmaz az idő irányára, és arra, hogy a Schrödinger-egyenletnek két típusa létezhet, az egyik az avanszált, a másik a retardált hullámokat írja le. Mindezek után nem meglepő, ha arról értesülünk, hogy a megoldásoknak ez a két családja a kvantummechanika hullámeqyenletének teljes mértékben relativisztikus változata esetében valóban pontosan egymás komplex konjugáltjai. A hagyománytisztelő fizikusok azonban mintegy 70 éven keresztül jobbra figyelmen kívül hagyták a megoldások két csoportja közül az egyiket, mondván, hogy „nyilvánvalóan” semmi értelme az időben visszafelé haladó hullámokról beszélni!

Mindennek a figyelemreméltó következménye az, hogy már 1926 óta minden alkalommal, amikor a fizikusok az egyszerű Schrödinger-egyenlet komplex konjugáltját képezték, és ezzel az egyenlettel kombinálva kiszámították a kvantummechanikai valószínűséget, akkor valójában mindig az egyenletek

avanzsált hullámokat tartalmazó megoldását, és az időben visszafelé haladó hullámok hatását vették figyelembe, anélkül, hogy erről tudtak volna. A kvantummechanika Cramer-féle értelmezésének a matematikai háttérével az égvilágon semmi probléma nincs, mert a matematika egészen a Schrödinger-egyenlet szintjéig pontosan ugyanaz, mint a standard koppenhágai értelmezés esetében. A különbség a szó szoros értelmében kizárólag az értelmezésben van. Amint Cramer az 1968-as cikkében (660. oldal) megfogalmazta: „a mező lényegében kényelmes matematikai eszközzé válik a távolható folyamatok leírására”. Ez pontosan ugyanaz a következtetés, amelyre Chu is jutott, hét évvel később, tőle függetlenül. Nos, miután tehát sikerült meggyőzőnöm Önöket (legalábbis remélem) arról, hogy ez a megközelítés értelmes, akkor lássuk, hogyan magyarázza meg a kvantumvilág néhány rejtélyét és paradoxonát.

Kezet rázunk a Világegyetemmel

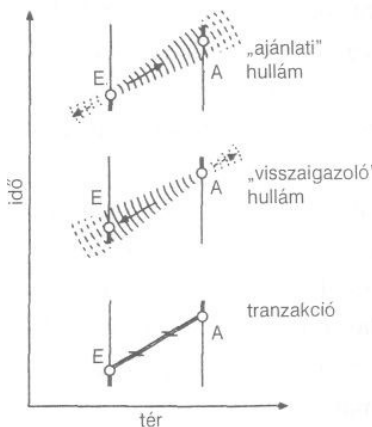
Cramer leírása szerint egy tipikus kvantummechanikai „tranzakcióban” egy részecske „kezet ráz” egy térben és időben másutt tartózkodó részecskével. Arra gondolhatunk például, amikor egy elektron elektromágneses sugárzást bocsát ki, amely sugárzást azután egy másik elektron elnyel. A leírás azonban akkor is működik, ha olyan kvantummechanikai képződmény állapotvektoráról van szó, amely kezdetben egy adott állapotban van, majd valamilyen kölcsönhatás eredményeképpen más állapotba kerül - itt például egy olyan részecske állapotvektorára gondolhatunk, amelyet a kétréses kísérlet egyik oldalán lévő forrás kibocsátott, majd a kísérleti elrendezés másik oldalán elhelyezett detektor elnyelt. Bármely ilyen leírással kapcsolatban nagy nehézséget okoz, ha közérthető nyelven akarjuk megfogalmazni, mi történik azokban a kölcsönhatásokban, amelyek egyidejűleg két irányban játszódnak le, és ennek megfelelően pillanatszerűen következnek be, legalábbis ha utóbbi fogalmat hétköznapi óráinkkal szerzett tapasztalataink alapján próbáljuk elképzelni. Cramer ezt úgy oldja meg, hogy az időn kívül áll, és a leírás során nyelvi eszközként valamiféle pszeudoidó fogalmát használja. Ez valóban nem több egyszerű nyelvi kifejezőeszköznél, de természetesen segít a tisztánlátásban.

A dolog a következőképpen működik. Amikor egy elektron rezeg, akkor e kép értelmében oly módon próbál meg sugárzást kibocsátani, hogy a jövő felé terjedő retardált hullámok és a múlt felé terjedő avanzsált hullámok időben szimmetrikus keverékeként létrehoz valamilyen mezőt. Ha a lejátszódó eseményekről képet akarunk kapni, első lépésként hagyjuk el az avanzsált hullámot és kövessük csak a retardált hullám történetét. Ez mindaddig a jövő felé halad, amíg nem találkozik egy elektronnal, amely elnyeli a mező által szállított energiát. A folyamat hatására az energiát elnyelő elektron vibrálni kezd, amely vibráció új retardált mezőt hoz létre, amely pontosan megsemmisíti az első retardált mezőt. Az elnyelő elektron jövőjében tehát a folyamat nettó eredményeképpen egyáltalán nincs jelen retardált mező.

Ám az elnyelő részecske negatív energiájú avanzsált hullámot is kelt, amelyik

visszafelé halad az időben, a sugárzást kibocsátó részecske felé, pontosan az eredeti retardált hullám nyomvonalán. A kibocsátó forrásnál az avanzsált hullám elnyelődik, aminek hatására az eredeti elektron visszalökődik, méghozzá pontosan oly módon, hogy egy második avanzsált hullámot bocsát ki a múlt irányába. Ez az „új” avanzsált hullám pontosan megsemmisíti az „eredeti” avanzsált hullámot, ezért a folyamatok együttes eredményeképpen az eredeti emisszió pillanatát megelőzően semmiféle sugárzás nem fog az időben visszafelé haladni. Végeredményben tehát csak az emittert és az abszorbert összekötő, kettős hullám marad meg, amelynek a felét a pozitív energiát a jövő felé szállító retardált hullám, másik felét pedig a negatív energiát a múlt irányába (a negatív idő irányába) szállító avanzsált hullám alkotja. Minthogy a két negatív együttes hatása pozitív lesz, ez az avanzsált hullám pontosan úgy adódik össze az eredeti retardált hullámmal, mintha ő maga is retardált hullám lenne, amelyik azonban az emittertől az abszorber felé tartana.⁹⁷

Cramer szavaival: „Az emittert úgy tekinthetjük, mint ami az abszorber felé haladó »ajánlatot« tesz. Az abszorber visszaküld egy »visszaigazoló« hullámot a feladónak, miáltal a tranzakció egy a téridőn keresztüli »kézfogással« lezártnak tekinthető.⁹⁸ Ez azonban csak a pseudoidő szempontjából tekintett eseménysor. A valóságban a folyamat időtlen; minden egyszerre történik. Ez azért van így, mert a fénysebességgel terjedő jelek számára nincs szükség időre utazásuk végrehajtásához - tulajdonképpen a fényjelek számára a Világegyetem bármely pontja a Világegyetem bármely másik pontjával közvetlenül szomszédos. Az, hogy a jelek az időben előre felé vagy visszafelé terjednek, nem számít, minthogy (saját vonatkoztatási rendszerükben) nulla időre van szükségük a távolság legyőzéséhez, márpedig $+0$ ugyanannyi, mint -0 .



97 Az egész érvelés akkor is működik, ha az „abszorber” elektronból indulunk ki, amelyik a múlt felé bocsát ki sugárzást. Maga a tranzakciós értelmezés semmit sem mond arról, melyik idő'irányt kellene előnyben részesítenünk a másikkal szemben. Felveti azonban, hogy az idő' iránya a Világegyetem kezdeti feltételeivel állhat kapcsolatban, ami viszont az Ősrobbanástól kiinduló idő'irányt részesíti előnyben.

98 „Transactional interpretation”, 661. oldal.

29. ábra A kvantummechanika John Cramer szerinti „tranzakciós értelmezését” foglalja össze az ábra. Felülről lefelé haladva, első lépésként az E emitter kiküld a jövőbe és a múltba egy „ajánlati hullámot” (fent). Ezt az A abszorber felfogja, és válaszul „visszaigazoló hullámot” küld az időben visszafelé és a jövőbe (középen). Az ajánlati hullám és a visszaigazoló hullám a Világegyetemben mindenütt megsemmisíti egymást, kivéve az abszorber és az emitter közötti közvetlen útvonalat, ahol viszont egymást erősítve kvantummechanikai tranzakciót hoznak létre. Mindaz, amire a kvantumvilág rejtélyeinek magyarázatához szükségünk van, megtalálható a vázlaton. Ez korunk mítosza.

Három dimenzióban a helyzet sokkal bonyolultabb, de a végkövetkeztetés változatlan. A lehető legszélsőségesebb esetet, egy csupán egyetlen elektront tartalmazó világegyetem példáját tekintve, megállapítható, hogy az elektron egyáltalán nem képes sugározni (sőt ha a Mach-elv igaz, akkor még csak tömege sincs). Ha csupán egyetlen további elektron létezne ugyanabban a világegyetemben, akkor az első elektron már képes lenne sugárzást kibocsátani, de csakis a második, „elnyelő” elektron irányába. A valóságos Világegyetemben, ha az anyag eloszlása nagy léptékben nem egyenletes, és bizonyos irányokban emiatt kisebb lenne a sugárzás elnyelésének a valószínűsége, mint más irányokban, akkor azt látnánk, hogy az emitterek (például a rádióantennák) „megtagadnák” a jelek minden irányban egyenletes erősséggel történő kisugárzását. Valójában már megpróbálták ezt a lehetőséget kísérletileg, a Világegyetembe különböző irányokban kisugárzott, mikrohullámú nyalábokkal ellenőrizni, azonban a mérések során semmi olyant nem tapasztaltak, hogy az elektronok bizonyos irányokba vonakodtak volna sugározni.

Cramer minden lehetséges módon hangsúlyozta, hogy az általa adott értelmezés nem ad a hagyományos kvantummechanikáétól eltérő előrejelzéseket. A modellt csak fogalmi modellnek kell tekinteni, amely segít világosan látni, mi is történik a kvantumvilágban. Olyan eszköz tehát, amely valószínűleg elsősorban az oktatásban lesz hasznos, és amely különösen értékes segítséget nyújt, ha mélyebben bele akarunk látni az egyébként rejtélyes kvantumjelenségekbe. Nem kell azonban azt gondolnunk, hogy emiatt a tranzakciós értelmezés értékében elmarad a kvantummechanika más értelmezéseitől, hiszen, mint láttuk, azok között sincs egyetlen olyan sem, amelyik több lenne a kvantummechanika jelenségeinek megértését megkönnyítő, fogalmi modellnél, ráadásul minden értelmezés ugyanazokhoz az előrejelzésekhez vezet. Valamelyik értelmezés kiválasztásának és a többivel szemben előnyben részesítésének egyetlen érvényes kritériuma csakis az lehet, hogy az egyes értelmezések mennyiben segítik elő gondolkodásunkat az ismert rejtélyekről - márpedig ebből a szempontból Cramer értelmezése utcahosszal megelőzi a riválisokat.

Először is ez az értelmezés a pusztá sejtésnél többet kínál annak magyarázatára, miért van az időnek iránya, sőt ezenfelül minden fizikai folyamatot azonos mércével mér. Nincs szükség arra, hogy a megfigyelőnek (legyen az akár intelligens, akár nem) vagy a mérőberendezésnek valamilyen megkülönböztetett szerepet biztosítsunk. Egy csapásra kihúzza a talajt a legtöbb, a kvantummechanika jelentéséről immár több mint fél évszázada folyó filozófiai vita

lába alól. Végül, a tranzakciós értelmezés túllép a megfigyelő szerepéről folytatott vitán, és valóban megoldja a kvantummechanika rejtélyeit. Erre csupán néhány példát fogok felsorakoztatni - bemutatom, miként kezeli Cramer a kétréses kísérletet, és hogyan ad értelmet az Aspect-kísérletnek.

Ha meg akarjuk magyarázni a kétréses kísérlet középpontjában álló rejtélyt, akkor legjobb, ha az elejétől a végéig mindenre kitérünk és a rejtély legvégső változata mellett megmagyarázzuk John Wheeler variációját ugyanerre a témára, továbbá a harmadik fejezetben részletesen tárgyalt „késleltetett választásos” kísérletet. Emlékezzünk vissza, hogy a kísérlet egyik változatában a fényforrás egyenként bocsátja ki a fotonokat, amelyek ezután végighaladnak a kétréses kísérleti berendezésen. A berendezés másik oldalán detektorernyőt helyeztünk el, amely feljegyzí a fotonok beérkezésének pontos helyét, de a detektort véletlenszerűen ki lehet kapcsolni, amikor már a foton úton van a kísérleti berendezésen belül. Ezzel lehetővé tesszük, hogy a foton a két résre fókuszált egy-egy távcső valamelyikén haladjon keresztül. Ha a detektorernyő ki van kapcsolva, akkor a távcsövek egyenként figyelik meg a fotonokat, amelyek vagy az egyik, vagy pedig a másik résen mennek át, ennek megfelelően nincs jele az interferenciának. Ha az ernyőt bekapcsoljuk, úgy tűnik, mintha a fotonok egyidejűleg mindkét résen keresztülmennének, ezért az ernyőn interferenciakép alakul ki. Megtehetjük, hogy a képernyőt mindig csak akkor kapcsoljuk ki, miután a fotonok áthaladtak a résen, ezért úgy látszik, mintha a fotonok döntését, hogy melyik elrendezéshez kell alkalmazkodniuk, egy olyan esemény befolyásolná, amely később történik, mint ahogy az erre vonatkozó döntést a fotonnak meg kell hoznia.

Az események Cramer-féle változatában a retardált „ajánlati hullám” (amelyet tárgyalásunk kedvéért pszeudoidőben követünk) a kísérlet mindkét résén áthalad. Ha a képernyő be van kapcsolva, akkor a detektor elnyeli a hullámot, ami kiváltja az avanszált „visszaigazoló hullámot”, amelyik a berendezés mindkét résén áthaladva visszamegy a forráshoz. A végső tranzakció tehát mindkét lehetséges pálya mentén alakul ki (tulajdonképpen, ahogy Feynman megfogalmazná, az összes lehetséges pálya mentén), azért létrejön az interferencia.

Ha a képernyő ki van kapcsolva, akkor az ajánlati hullám keresztülhalad a résekre irányzott két távcsövön. Mivel a két távcső különböző résekre irányul, a visszaigazoló hullám, amelyik akkor keletkezik, amikor az ajánlati hullám eléri a távcsövet, csak azon a résen tud visszamenni, amelyikre az adott távcsövet ráirányítottuk. Természetesen az abszorpciós eseményben egy egész fotonnak kell részt vennie, nem a foton egy részének. Bár mindkét távcső képes a saját résén keresztül visszaigazoló hullámokat visszaküldeni, a forrásnak (véletlenszerűen) „ki kell választania” melyiket fogadja el, aminek eredményeképpen a végső tranzakció egyetlen foton egyetlen résen történő áthaladásáról szól. A foton fejlődő állapotvektora „tudja”, hogy a képernyőt ki vagy be szándékozunk kapcsolni, mert a visszaigazoló hullám valóban az időben visszafelé halad keresztül a kísérleti berendezésen, ám az egész tranzakció, mint korábban, ezúttal is időtlen.

A továbbiakban nincs jelentősége annak a kérdésnek, hogy mikor dönti el a

megfigyelő, melyik kísérletet akarja végrehajtani. A megfigyelő kijelölte a kísérleti elrendezést és a határfeltételeket, ezután a tranzakció ezeknek megfelelően történik meg. Sőt mi több, a továbbiakban annak sincs jelentősége, hogy a detektálás során történik-e mérés (vagy esetleg valamilyen tetszőleges egyéb kölcsönhatás lép fel), ezért a megfigyelőnek nincs kitüntetett szerepe a folyamatban.⁹⁹

Elszórakoztathatjuk magunkat azzal, hogy hasonló magyarázatot ötlünk ki arra vonatkozóan, mi történik Schrödinger macskájával (és Wigner barátjával). Ebben az esetben is csak az a lényeg, hogy a befejezett tranzakció csak egyetlen lehetőséget enged meg valóságosként (a macska vagy él, vagy elpusztult), és minthogy a „hullámfüggvény összeomlásának” nem kell megvárnia, amíg a megfigyelő belenéz a dobozba, nincs olyan időszak, amikor a macska félig élő és félig holt állapotban található. Mindez arra utal, milyen hatékony és lényegre törő a tranzakciós értelmezés, ezért bizonyos vagyok benne, hogy a részleteket Önök is ki tudják dolgozni anélkül, hogy mindezt le kellene írnom.

De vajon mi a helyzet a Bell-egyenlőtlenséggel, az Einstein-Podolsky-Rosen-kísérlettel és az Aspect-kísérlettel? Végül is ezek keltették fel újra az 1980-as években a kvantummechanika jelentése iránti érdeklődést. Az abszorberelmélet szempontjából semmilyen nehézséget sem okoz a történések megértése. Képzeljük el (továbbra is a pszeudoid fogalmaiban gondolkozva), hogy a két fotont kibocsátani készülő, gerjesztett atom különböző irányokba különböző polarizációs állapotú ajánlati hullámokat küld ki. A tranzakció csak akkor fejeződik be, és a fotonokat ténylegesen csak akkor sugározza ki, ha a megfelelő abszorberpár az időben visszafelé haladó avanszált visszaigazoló hullámot visszaküldi a fotonokat kisugárzó atomnak. Mihelyt a tranzakció teljessé válik, a fotonok kisugárzódnak, megfigyelik őket, miáltal kettős detektálás következik be, jöllehet a két észlelt foton egymástól térben távol tartózkodik. Ha a visszaigazoló hullám nem felel meg egyik megengedett polarizációs állapotnak sem, akkor ez a tranzakció nem valósulhat meg, vagyis elmarad az egyezséget megpecsételő kézfogás. A pszeudoid szempontjából nézve a fotonpár mindaddig nem sugárzódhat ki, amíg nem születik megegyezés arról, hogy a fotonok el is fognak nyelődni, amely elnyelődés során meghatározódik a kibocsátott fotonok polarizációs állapota, bár kibocsátásuk az elnyelésük „előtt” történt. A szó szoros értelmében lehetetlen, hogy az atom olyan fotonokat bocsásson ki, amelyek állapota nem felel meg a detektor által megengedett abszorpciós állapotoknak. Valójában az abszorber modell szerint az atom csak akkor tud fotont kisugározni, ha megegyezés született a foton elnyeléséről.

Ugyanez a helyzet az űrhajóikban a Tejútrendszer átellenes részei felé utazó két kiscica esetében is. A megfigyelés, amelyik eldönti, hogy a doboz melyik felében van az elektron, és ezáltal azt is, melyik kismacska él és melyik pusztult el, visszaküld egy, az időben visszafelé haladó jelet a kísérlet kezdete irányába. Ez a jel pillanatszerűen (vagy találóbban fogalmazva, időtlenül) meghatározza a cicák állapotát a kísérlet teljes időtartamára vonatkozóan, vagyis arra az időre is,

99 Cramer, 673. oldal.

amikor senki által meg nem figyelve mindketten be voltak zárva a saját űrhajójukba.

Ha van egyáltalán egyetlen kitüntetett szerepű esemény az eseménysorban, akkor az semmiképpen nem a láncolat utolsó eseménye. Sokkal inkább a láncolat kezdetén létrejövő kapcsolat, amikor a sugárzást kibocsátó atom felfogja az általa kibocsátott ajánlati hullámra beérkező, különböző visszaigazoló hullámokat, majd ezek közül az egyiket megerősíti, oly módon, hogy a szóban forgó megerősítő hullám a teljes tranzakcióként valóságossá válik. Az időtlen tranzakció végén nincsen „mikor”.¹⁰⁰

Ez az átütő erejű siker, amit a tranzakciós értelmezés a kvantummechanika összes rejtélyének megoldásában elért, egyetlen, a józan ész felfogásával homlokegyenest ellentétesnek látszó ötlet elfogadásának köszönhető - nevezetesen annak, hogy a kvantummechanikai hullám ténylegesen képes az időben visszafelé haladni. Első pillantásra ez szöges ellentétben áll a józan ész diktálta felfogásunkkal, amely szerint az oknak mindig meg kell előznie az okozatot. Ha azonban alaposabban szemügyre vesszük a helyzetet, akkor kiderül, hogy az időutazásnak a tranzakciós értelmezés által megkövetelt fajtája végső soron nem sérti meg az okság mindennapi fogalmát. Hasonlóképpen, ez a Világegyetemen keresztül létrejövő kézfogás nem szükségszerűen foszt meg bennünket attól, amit emberi sajátosságaink közül a legfontosabbnak tartunk: a szabad akarattól.

Megragadjuk az időt az idő létrehozására

A hétköznapi életben teljesen magától értetődő, hogy a következmények mindig követik az okokat. A fejemben megfogalmazom, mi lesz a következő mondat, amit le akarok írni, majd elkezdem nyomkodni a számítógépem billentyűit, és a másodperc törtrésze múlva a lenyomott billentyűknek megfelelő betűk sorban felvillannak a képernyőn. Nem fordul elő (sajnos), hogy a szavak előbb jelennek meg a képernyőn, majd elolvasom őket, és csak ezután fogalmazódik meg a fejemben, mit is akarok mondani. Ha viszont az időben visszafelé haladó, avanzsált kvantummechanikai hullámok segítségével létrejön az időtlen kézfogás, akkor ennek nincs szükségszerű kihatása a hétköznapi világ megszokott, logikus oksági rendszerére.

Cramer szerint az okságnak két fajtája létezik, ezeket „erősnek”, illetve „gyengének” nevezi. A „gyenge oksági elv” alkalmazódik a hétköznapi világunkra (a „makroszkopikus” világra), és ez az alapja az időről alkotott hétköznapi képünknek. Eszerint a makroszkopikus oknak bármely vonatkoztatási rendszerben meg kell előznie a makroszkopikus következményét. Makroszkopikus információ soha nem közvetíthető a fénysebességnél gyorsabban vagy az időben visszafelé. Ezzel a legtöbb ember egyetért. Cramer azonban definiálja az „erős oksági elvet”,

100 Cramer, 1986, 674. oldal.

amely szerint az oknak bármely vonatkoztatási rendszerben mindig meg kell előznie összes következményét, tehát még mikroszkopikus léptékben (vagyis a kvantumvilágban) sem továbbítható az információ a félynél gyorsabban, vagy az időben visszafelé. Ezt gyakran a gyenge oksági elv nyilvánvaló kiterjesztésének tekintik; Cramer azonban rámutat, hogy tulajdonképpen egyetlen kísérleti bizonyíték sem létezik, amelyik az erős oksági elvet támasztaná alá. Sőt tulajdonképpen az erre vonatkozó kísérletek eredménye - a Bell-egyenlőtlenség próbája - egyértelműen arra utal, hogy „mikroszkopikus” szinten sérül az okság elve, függetlenül attól, hogy a kvantummechanika melyik értelmezését részesítjük előnyben. Az abszorberelmélet szerint ugyancsak sérül az erős okság; ám a gyenge okság soha nem sérül, hiszen az abszorpció a jövő irányában mindig teljes.

Ezek után az sem lehet meglepő, hogy a tranzakciós értelmezés időfogalma különbözik a hétköznapi gondolkodásmódunkban elfogadottól. Ez azért van így, mert a tranzakciós értelmezés egyértelműen magában foglalja a relativitáselmélet hatását, azt viszont már láttuk, mennyire eltér a relativitáselmélet felfogása a hétköznapi fogalmainktól, különösen, amikor az idő kezeléséről van szó. A koppenhágai értelmezés ezzel szemben az időt a klasszikus, newtoni értelemben kezeli, lényegében ezért hiábavaló minden próbálkozásunk, amikor az Aspect-féle, és más kísérletek eredményeit össze akarjuk egyeztetni a koppenhágai értelmezés fogalmaival. Ha a fény sebessége végtelen lenne, akkor a problémák eltűnnének, hiszen nem lenne különbség a Bell-egyenlőtlenséget tartalmazó folyamatok lokális és nem lokális leírása között, továbbá a közönséges Schrödinger-egyenlet az események pontos leírását adná - a közönséges Schrödinger-egyenlet ugyanis valójában a helyes „relativisztikus” egyenlet, abban az esetben, ha a fénysebesség végtelen. Cramer valójában még finomabb kapcsolatot talált a relativitáselmélet és a kvantummechanika között, ez értelmezésének a lényege.

Hogyan befolyásolja az időtlen kézfogás a szabad akarat lehetőségét? Első pillanatban úgy tűnhet, mintha a múlt és a jövő közötti kommunikáció mindent rendbe tenne. Minden kisugárzott foton már a kisugárzása pillanatában „tudja”, mikor és hol fog elnyelődni; a kétréses kísérlet mindkét résén egyidejűleg, fénysebességgel átcsusszanó valószínűségi hullámok mindegyike már abban a pillanatban „tudja”, milyen detektor vár rá a kísérleti berendezés túlsó oldalán. Visszaérkeztünk tehát a befagyott Világegyetem képéhez, amit a foton szemszögéből láttunk, ahol sem a térnek, sem pedig az időnek nincs semmiféle jelentése, és minden, ami valaha volt, vagy bármikor lesz, az pontosan most van.

Ne feledkezzünk meg azonban arról, hogy ezt a képet a foton, vagy bármilyen más, fénysebességgel haladó objektum (például a kvantummechanikai valószínűségi hullám) nézőpontjából rajzoltuk fel. Makroszkopikus objektumok, például emberi lények esetében az idő azonban meglehetősen valóságos fogalom. A saját vonatkoztatási rendszeremben még van időm eldönteni, mi lesz a következő mondat, amit leírok, továbbá, hogy most tartsak-e ebédszünetet, vagy inkább húsz perc múlva. Az általam hozott döntések időtlen kvantummechanikai kapcsolatok egymással kölcsönható hálózatát hozhatják létre, így ha a foton

beszélni tudna, elmondhatná, miként befolyásolják ezek a döntések jövőbeli sorsomat. A gyenge oksági elv azonban megvéd attól, hogy információ szivároгjon át a mikrovilágból a makroszkopikusba. A saját vonatkoztatási rendszeremben ezek a döntések a zseniális szabad akarat eredményeképpen születnek meg. A makroszkopikus világban időbe telik azoknak a döntéseknek a meghozatala (mind az emberi döntések során, mind pedig a például az atom bomlásakor előforduló kvantummechanikai „választás” esetén), amelyek a mikrovilág időtlenségét valóságossá teszik. Amit mi érzékelünk, az sokkal inkább a Cramer-féle pszeudoidő, mintsem a kvantummechanikai kölcsönhatások mélyén meghúzódó időtlen kézfogások.

Legalábbis én így látom. Mint minden más a történetben, ez is csak analógia, vagy mítosz, vagy modell. Önök esetleg találhatnak valamilyen más módot, ahogyan a mindennapi időfogalmunk kölcsönhat az időtlen kvantumvilággal. Talán John Bell gonosz ötlete nyomán szívesebben látják azt a feltevést, hogy egyáltalán nem létezik semmiféle szabad akarat, a tranzakciós értelmezés sikere pedig nyilvánvalóvá teszi, hogy minden eleve elrendelt (legalábbis emberi szempontból). Eszerint nekem nincs más választásom, mint hogy megírjam ezt a könyvet, Önöknek pedig, hogy elolvassák. Bár a mikroszkopikus szinten a Világegyetemben érvényesülő távolhatás miatt esetleg kényelmetlenül érezzük magukat, és talán emiatt nehéz megérteni hétköznapi fogalmainkkal a múlt, a jelen és a jövő kapcsolatát, ám emlékezzünk vissza arra, hogy ez nem a tranzakciós értelmezés egyedi sajátossága. Ez kísérletileg igazolt tény, amit a kvantumvalóság minden kielégítő értelmezésénél figyelembe kell venni. Sőt mi több, ez a téridő különböző részeit egyetlen összefüggő egészzé összekapcsoló időtlenség meglehetősen jól megfelelni látszik a folytonos téridő „történelemnek” a második fejezetben tárgyalt, a relativitáselméletből származtatott képének. A tranzakciós értelmezés sikere nagyrészt annak a módszernek köszönhető, ahogyan nyíltan szembenéz a helyzettel, és a kvantumvilág Bell-egyenlőtlenség kísérleti ellenőrzése során feltárt időtlenségéből kiindulva kifelé építkezik.

Ismételten hangsúlyozom tehát, hogy minden ilyen értelmezés csupán mítosz, amely mankóként segít bennünket, amikor el akarjuk képzelni, mi történik kvantumszinten, és ellenőrizhető előrejelzéseket akarunk készíteni. Egyikük sem „az egyetlen igazság”, hanem inkább mindegyikük „valóságos”, még akkor is, ha egymásnak ellentmondanak. Cramer értelmezése azonban nagyon is korunk mítosza; könnyű dolgozni vele és könnyű felhasználni, ha a végbemenő eseményekről gondolati képet akarunk alkotni, sőt kis szerencséivel a tudósok következő generációja számára még a koppenhágai értelmezést is felülmúlhatja, mint a standard gondolkodásmód a kvantumfizikáról.

Természetesen ragyogó eszköz, ha a kezdőknek (vagyis bárkinek, akit még nem fertőzött meg a koppenhágai értelmezés) meg akarjuk tanítani a kvantumfizikát. Cramer ezt így fogalmazza meg:

A koppenhágai értelmezéstől való elszakadás különösen nehéz, mert több mint öt évtizeden keresztül hagyományosan jelentős szerepet töltött be a kvantummechanika tanításában. Az új értelmezéseknek köszönhetően

felbukkanó, a fizikai folyamatokra vonatkozó meglátások szerepét azonban nem szabad alábecsülni. A tapasztalat a fizika nagyon sok területén azt mutatta, hogy a haladást, az új ötleteket és megközelítéseket éppen az ösztönözte, hogy világosan elképzelhetővé akartuk tenni a fizikai jelenségeket.¹⁰¹

Még 1977-ben, azokat a nehézségeket tárgyalva, amikor a kvantummechanikai kísérletek eredményét a kölcsönhatások fogalmaival igyekeztek értelmezni, Fred Hoyle az alábbi megjegyzést tette: „Egy szép napon elérkezhet a siker, azonban azt csakis a fizikának valamilyen nemlokális formája hozhatja meg, az a fajta fizika, amelyik manapság egyáltalán nem népszerű”.¹⁰² Ma már megmutatkoznak annak a jelei, hogy Hoyle jövőbe látó megjegyzése és Cramer reménye beteljesedhet, például Chunak a gravitáció természetével kapcsolatban végzett munkájának köszönhetően. Ezzel azonban még nincs vége a kvantummechanika történetének, inkább a történet egy új fejezetének a kezdetéről beszélhetünk. Van azonban a sorsnak még egy furcsa fintora, ezzel szeretném lezárni a történet eddigi részéről szóló beszámolómat. A XX. század jelentős fizikusai közül Richard Feynman volt az egyetlen, aki világosan és sokszor kifejtette a kvantummechanika standard formájának alapvető felfoghatatlanságát. Az 1960-as évek közepén például *A fizikai törvények jellege* című könyvében így fogalmaz:

Volt egy időszak, amikor az újságok azt írták, hogy mindössze tizenkét ember érti a relativitáselméletet. Én nem hiszem, hogy valaha is volt ilyen időszak. Talán lehetett egy időszak, amikor csak egy ember értette, mert ő volt az egyetlen fickó, aki gyorsan kapcsolt, majd ezután megírta a cikkét. Miután azonban az emberek elolvasták a cikket, így vagy úgy nagyon sokan megértették a relativitáselméletet, természetesen tizenkettőnél sokkal többen. Másrészt viszont, azt hiszem, nyugodtan kijelenthetem, hogy a kvantummechanikát senki sem érti. ... Ha nem muszáj, ne kérdezd meg magadtól: „hogyan lehet ilyen?”, mert eltűnsz abban a zsákutcában, ahonnan még soha, senkinek nem sikerült kimenekülnie. Senki sem tudja, hogy lehet ilyen.¹⁰³

A sors fintora természetesen az, hogy a zsákutcaból való kimenekülés lehetősége éppen azon a fényelméleten alapul, amelyet maga Feynman alkotott meg, húsz évvel az idézett megjegyzését megelőzően. További harminc évbe telt azonban, mire mindez világossá vált. Lehet, hogy mindez csak korunk mítosza, azonban John Cramer tranzakciós értelmezésében éppen az a nagyszerű, hogy ennek

101 1986, 681. oldal.

102 Hoyle: *Ten Faces of the Universe* (Heinemann, London, 1977), 128. oldal. 106-129. oldal. BBC Publications, London, 1965 (az 1964-ben tartott előadások alapján, az MIT Press először 1967-ben, majd azóta többször is utánnyomásban kiadta).

103 Richard Feynman: *The Character of Physical Law* (Penguin, London, 1992). (Magyarul: *Afizikai törvények jellege*; Budapest, Magvető Könyvkiadó, 1984) Az először 1965-ben megjelent, a BBC-sorozata alapján készült könyv új kiadása. Csak egyik fejezete foglalkozik a kvantumelmélettel, de az egész könyvet érdemes elolvasni - nem utolsósorban Feynman eredeti stílusa kedvéért.

nyomán feltehetjük a kérdést: „hogyan lehet ilyen?”. És a kérdésre egyszerû, könnyen érthetõ választ tudunk adni, ami nem vezet a zsákutcába. Mit várhatnánk még ezen kívül a kvantummechanika bármely értelmezésétõl?

Irodalom

A szöveg közben többnyire szakkönyvekre vagy tudományos cikkekre hivatkozom, ehelyütt azokat a könyveket sorolom fel, amelyeket különösen hasznosnak (bizonyos esetekben jelentõs hatásúnak) találtam a kvantumvalóság jelentésérõl és a fizika lényegérõl szóló gondolataim kialakítása során. Saját könyveim közül is többet feltüntettem az irodalomjegyzékben, mert ezeken keresztül nyomon követhetõ, miként változtak saját elképzeléseim az elmúlt két évtizedben.

David Albert: Quantum Mechanics and Experience (Harvard University Press, Cambridge, Mass. 1992).

A kvantummechanika „sokelme” értelmezése mellett száll síkra, de nem gyõz meg. Ha valakit érdekel a kérdés, itt tud utánanézni, hogy számára mennyire tûnnek meggyõzõnek az érvek.

Hans von Baeyer: Taming the Atom (Viking, London 1992).

Jó áttekintést ad az atomok és a molekulák világáról, megdöbbentõ képeket közöl egy-egy atomról, a DNS molekuláról és a mikrovilág egyéb csodáiról. Figyeljünk azonban oda a könyvben elõforduló néhány hibára, többek között a héliumatom szerkezetének „magyarázatára”.

Jim Baggott: The Meaning of Quantum Theory (Oxford University Press, Oxford, 1992).

Szakmai jellegû beszámoló egy olyan fizikus tollából, aki csak 1987-ben döbbsen rá Bell-tételének jelentõségére. Addig a boldog tudatlanság állapotában volt, legalábbis ami a kvantummechanikai távolhatás jelentõségét illeti. Ha az egyenleteket kihagyjuk, a könyv legfõbb vonzereje a szerzõ naív rácsodálkozása az általa frissiben felfedezett rejtélyekre.

Ralph Baierlein: Newton to Einstein (Cambridge University Press, Cambridge, 1992).

A könyv a nem természettudományi szakos egyetemisták számára íródott, ezért viszonylag érthetõ mindazok számára, akik érdeklõdnek a téma iránt. A fény kettõs, részecske- és hullámtermészetével foglalkozik, továbbá körvonalazza a speciális relativitáselmélet lényegét. Ennek ellenére szakkönyvnek tekinthetõ, ám az átlagos szakkönyveknél sokkal könnyebben érthetõ.

J. S. Bell: Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics (Cambridge University Press, Cambridge, 1987).

John Bell összes cikkének gyűjteménye a kvantummechanika fogalmi és filozófiai problémáiról. Egyes cikkek könnyen érthetőek, mások túlzottan szakmaiak.

Paul Davies: Other Worlds (Pelican, London, 1988; eredeti kiadás: J. M. Dent, London, 1980).

Jó, de kissé elavult áttekintés a kvantummechanika háttéréről. A könyv még az Aspect-kísérlet elvégzése előtt született. Ígéretes képet fest a sokvilág-elméletről, és bemutatja azokat az antropikus „egybeeséseket”, amelyeknek köszönhetően a világ éppen olyan, amilyennek látjuk.

Paul Davies és J. R. Brown (szerk.): The Ghost in the Atom (Cambridge University Press, Cambridge, 1986).

A kvantumelmélet jelentésének különböző értelmezései „első kézből”, a BBC Rádió sorozatában készített interjúk alapján. Kiemelkedő szakemberek érvelnek a kölcsönösen összeegyeztethetetlen lehetőségek mellett, amelyek mindegyike ugyanazon bizonyítékokon nyugszik. Gyönyörű példa a fizikusok körében a kvantummechanika értelmezése körül uralkodó zűrzavarra.

David Deutsch: The Fabric of Reality (Viking, London, 1995).

Nagyon személyes hangú leírás a kvantumvalóságról, Hugh Everett „sokvilág”-elmélete alapján, néhány izgalmas, az idő természetére vonatkozó ötlettel.

J. W. Dunne: An Experiment with Time, 3. kiadás (Faber & Faber, London, 1934).

Az idő természetének kissé misztikus tárgyalása. Világossá teszi az idő második rétegének szükségességét, ha mérni akarjuk a hétköznapi idő „folyását”, továbbá a harmadik réteg szükségességét, ha meg akarjuk mérni a második réteget, és így tovább, a végtelenségig.

C. W. F. Everitt: James Clerk Maxwell (Scribner's, New York, 1975). Maxwell életének és munkásságának lényegre törő összefoglalása.

J. Fauvel, R. Flood, M. Shortland and R. Wilson (szerk.): Let Newton Be! (Oxford University Press, Oxford, 1988). Nagyon könnyen érthető cikkgyűjtemény Newtonról és munkásságáról.

Richard Feynman: QED: The strange theory of light and matter (Penguin, London, 1990).

(Magyarul: QED: a megszilárdult fény; Budapest, Scolar Kiadó, 2003) Az először 1985-ben megjelent könyv legújabb kiadása. A könyv Feynman által 1983-ban, Los Angelesben laikus hallgatók számára tartott előadássorozata alapján készült.

Nagyszerű példa arra, milyen szemléletesen tudja Feynman elmagyarázni a kvantumfizika működését.

Richard Feynman: Six Easy Pieces (Addison Wesley Mass., 1995).

(Magyarul: Hat könnyed előadás; Budapest, Park-Akkord közös kiadás, 2000)

Feynman híres, bevezető fizikai előadás-sorozatának (lásd lent) hat darabja, többek között bevezetés a kvantumfizikába.

Richard Feynman, Robert Leighton és Matthew Sands: The Feynman Lectures on Physics, III. kötet (Addison-Wesley, Mass., 1965). (Magyarul: Mai fizika 7,8,9. kötetek; Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1970) Feynman híres előadás-sorozata írott változatának a kvantumelmélettel foglalkozó kötete. Egyetemek első éves hallgatói és a téma iránt érdeklődők számára könnyen érthető szöveg.

Richard Feynman és Steven Weinberg: Elementary Particles and the Laws of Physics (Cambridge University Press, Cambridge 1987). Két, az 1980-as évek közepén, Cambridge-ben Paul Dirac tiszteletére tartott előadás írott változata. Nagyon jó bepillantás a fizikusok gondolkodásmódjába.

Kathleen Freeman: Ancilla to the Pre-Socratic Philosophers (Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1983). Empedoklész művének az első fejezetben hivatkozott részeit tartalmazó munka.

James Gleick: Genius (Little Brown, London, 1992).

Átfogó tanulmány Richard Feynman életéről és munkásságáról a XX. század fizikájának összefüggésében.

John Gribbin: In Search of Schrödinger's Cat (Bantam, New York és Black Swan, London, 1984).

(Magyarul: Schrödinger macskája; Budapest, Akkord Kiadó, 2001) Ott hagyom abba, ahol a most az olvasó kezében tartott könyv története kezdődik. Laikusok számára a legjobb összefoglaló a kvantummechanika történetének kezdeteiről (ezt nyugodtan kijelenthetem, ugye?).

John Gribbin: In Search of the Big Bang (Bantam, New York és Black Swan, London, 1986).

A Világegyetem eredetének a kvantumfizika elképzeléseit is figyelembe vevő, standard elmélete.

John Gribbin: In Search of the Edge of Time (Harmony, New York, és Black Swan, London, 1992).

Beszámolóm a relativitáselmélet kezdeteiről és következményeiről, beleértve az időről alkotott felfogásunkat és az időutazás lehetőségét.

John Gribbin: In the Beginning (Little Brown, New York és Viking, London, 1993).

A legújabb elképzelések a Világegyetem eredetéről és a „zártóságára” vonatkozó bizonyítékok, amennyiben azok kielégítik a Wheeler-Feynman-féle abszorberelmélet követelményeit.

John és Mary Gribbin: Time and Space (Dorling Kindersley, London, 1994).

Megpróbáltuk közérthető, bőségesen illusztrált formában, kevés szöveggel egyszerűen elmagyarázni Einstein relativitáselméleteit. Segíthet a második fejezetben kifejtett elképzelések pontosabb megértésében.

Herman Haken, Anders Karlqvist és Uno Svedin (szerk.): The Machine as Metaphor and Tool (Springer-Verlag, Berlin, 1993).

Egy, a svédországi Abiskóban, 1990 májusában tartott konferencia cikkgyűjteménye. A konferencia témája a gép és annak különböző összefüggésekben - beleértve a tudományos világképet - metaforaként való használata. Főként az agyról szól, és az általam az első fejezetben érintett kérdésekhez kapcsolódik.

Nick Herbert: Quantum Reality (Rider, London, 1985).

A kvantumelmélet különböző értelmezéseinek nagyon olvasmányos, bár kissé idejétmúlt bemutatása.

Roger Jones: Physics as Metaphor (University of Minnesota Press, Minneapolis, Minn., 1982).

Áttekinti, miként gondolkoznak a fizikusok a világról, valamint megkérdőjelezi a modellek és a valóság viszonyáról alkotott hétköznapi feltevéseinket.

Martin Krieger: Doing Physics (Indiana University Press, Bloomington, Ind., 1992).

Gondolatébresztő könyv, amely az általam ismert munkák közül a legvilágosabban és a leghatározottabban állítja, hogy a fizika nem egyszerűen az analógiák és metaforák rendszerén - más szavakkal fikciókon - alapul, hanem maga a fizika nem más, mint az analógiák és metaforák rendszere. Alaposan és logikusan megindokolt, de gondosan át kell tanulmányozni. Ha azonban vesszük a fáradságot, akkor soha többé nem fogjuk ugyanolyannak látni a tudomány világát, mint annak előtte.

Thomas Kuhn: The Structure of Scientific Revolutions (University of Chicago Press, Chicago, 1970).

(Magyarul: A tudományos forradalmak szerkezete; Budapest, Osiris Kiadó, 2000)

Klasszikus mű arról, miként dolgoznak és gondolkodnak a tudósok - továbbá arról, hogyan és miért változtatják meg néha a véleményüket.

Jean-Pierre Maury: Newton: Understanding the Cosmos (Thames & Hudson, London, 1992).

Egy először 1990-ben megjelent francia könyv angol fordítása. Messze a legjobb „nagyon gyors bevezető” Newton munkásságába. A szöveg olvasmányos, színes illusztrációk gazdagítják, és mindez összesen 144 oldalon.

Dugaid Murdoch: Niels Bohr's Philosophy of Physics (Cambridge University Press, Cambridge, 1987).

Tudományos igényű beszámoló arról, mit alkotott Bohr a kvantummechanika területén, különös tekintettel arra, pontosan mit is értett azon, amit ma koppenhágai értelmezésnek nevezünk. Nem mindig könnyű olvasmány, azonban a legmegfelelőbb forrás, ha a részletkérdésekre is kíváncsiak vagyunk.

Heinz Pagels: The Cosmic Code (Michael Joseph, London, 1982).

Világos és érdekes tudósítás a kvantumvilág furcsaságairól (különös tekintettel a koppenhágai értelmezésre). A könyvet a jó íráskészséggel megáldott, kiemelkedő fizikus még azt megelőzően írta, amikor az Aspect-kísérlet eredménye nyomán a kvantummechanika különböző értelmezései ismét az érdeklődés középpontjába kerültek.

Roger Penrose: The Emperor's New Mind (Oxford University Press, Oxford, 1989).

(Magyarul: A császár új elméje; Budapest, Akadémiai Kiadó, 1993) Azt bizonyítandó, hogy nem létezhetnek valóban intelligens számítógépek, Penrose végigkalauzolja az olvasót a modern fizikán, a kvantumelméletet is beleértve. Helyenként nehéz, másutt magával ragadó, gyakran vitatható, de mindenképpen érdemes elolvasni.

Andrew Pickering: Constructing Quarks (Edinburgh University Press, Edinburgh, 1984).

Lebilincselő beszámoló a modern részecskefizika történetéről. Helyenként nehéz, de a történetet és a végső (?) elméletet nem úgy mutatja be, mintha a fizikusoknak fel kellene tárniuk az addig a szemük előtt elrejtett igazságot, hanem azt a folyamatot érzékelteti, ahogy a kísérleteik és elméleteik alapján ők maguk létrehozzák a valóságot. Megéri alaposan végigböngészni.

William Poundstone: Labyrinths of Reason (Anchor Books, New York, 1988). Közérthető betekintés abba, miként látják a fizikusok a világot.

Ilya Prigogine és Isabelle Stengers: Order out of Chaos (Heinemann, London, 1984).

Jó bevezető Prigogine elgondolásaiba a bonyolultságról és az idő irányáról, ám helyenként igen nehéz olvasmány. A téma még nehezebb változata olvasható Prigogine egyedül írott, From Being to Becoming (Freeman, San Francisco, 1980) című könyvében.

Prigogine egy sor könyvben fejtette ki elgondolásait, amelyek telis-tele vannak izgalmas ötletekkel, ám amelyeket helyenként nagyon nehéznek talállok. Szerencsére ezeknek az elképzeléseknek a kvantumvilággal való lehetséges kapcsolatát meglehetősen világosan tárgyalja Alastair Rae Quantum Physics: Illusion or Reality? (lásd lent) című könyvében, amelynek gyors átfutását mindenképpen javaslom.

Alastair Rae: Quantum Physics: Illusion or Reality? (Cambridge University Press, Cambridge, 1986).

Szokványos útmutató a laikusok számára. Többek között Ilya Prigogine munkásságának tárgyalását is tartalmazza, még hozzá érthetőbben, mint Prigogine saját munkái.

Henry Stapp: Mind, Matter, and Quantum Mechanics (Springer-Verlag, Berlin, 1993).

Stapp helyenként igen nehéz cikkgyűjteménye. Minden egyes cikkben a kvantumelmélet és a tudatosság kérdésével foglalkozik. Mivel elképzeléseit sokszor, és mindig kissé különböző módon mutatja be, a kitartó olvasó végül is legalább valamilyen benyomást kap arról, miről is van szó. Megéri a fáradságot, ha mélyebben el akarnak merülni az elme és az anyag könyvem negyedik fejezetében említett problémájában.

John Tyndall: On Light (Longman, London, 1873).

Gyönyörű könyv Tyndallnak az Egyesült Államokban tett előadókörútján tartott előadásai alapján. Izgalmas betekintés a viktoriánus kor természettudományába, annak az embernek a tollából, aki először jött rá arra, miért kék az ég. Erre vonatkozó elképzeléseit ennek a kötetnek a 152. oldalán fejt ki.

Robert Weber: Pioneers of Science, 2. kiadás (Adam Hüger, Bristol, 1988). Az összes fizikai Nobel-díjas rövid bemutatása az elsőtől (Wilhelm Röntgen, 1901) Alex Müllerig és Georg Bednorzig (1987).

Richard Westfall: Never at Rest (Cambridge University Press, Cambridge, 1980). Newton pontos életrajza. Ugyanezen könyv rövidebb változatát a Cambridge University Press The Life of Isaac Newton címmel 1993-ban jelentette meg. Utóbbit talán könnyebb megszerezni, de a teljes változat sokkal jobb.

John Wheeler és Wojciech Zurek: Quantum Theory and Measurement (Princeton University Press, Princeton, 1983).

A kvantumelmélet jelentésének vizsgálatával foglalkozó klasszikus cikkek nagyszerű gyűjteménye. Az EPR-cikk, Schrödinger macskájának első felbukkanása, Bohm, Bell és Aspect munkái mind itt vannak. Rajtuk kívül sokan mások is megjelennek, sajnos Cramer azonban hiányzik. A kötetben kevés a kommentár, magas szintű, szakmai szöveg, de egy könyvtárban érdemes belelapozgatni.

Arthur Zajonc: Catching the Light (Bantam, London, 1993). ...

Lebilincselő visszapillantás a fény történetére. A tudományos tények mellett képzőművészi és költői benyomások is helyet kaptak a kötetben.

További magyar nyelven megjelent irodalom:

Amir Aczel: Isten egyenlete (Akkord Kiadó, 2004),

Brian Greene: Az elegáns univerzum (Akkord Kiadó, 2003),

John Gribbin: A tudomány története (Akkord Kiadó 2004)

Richard Feynman: Hat majdnem könnyű előadás (Akkord Kiadó, 2004),

Roger Penrose: A nagy, a kicsi és az emberi elme (Akkord Kiadó, 2004),

Martin Rees: Kozmikus otthonunk (Akkord Kiadó, 2003).