

SEAN CARROLL

A MÉLYEN ELREJTETT VALÓSÁG

SEAN CARROLL

A MÉLYEN ELREJTETT VALÓSÁG

Kvantumvilágok és a tér idő
megjelenése

Fordította
GERNER JÓZSEF


TYPOTEX

A fordítás a következő kiadás alapján készült:
Something Deeply Hidden. Quantum Worlds and the Emergence of Spacetime.
Dutton, New York, 2019
Copyright © 2019 by Sean Carroll.
All rights reserved.
Hungarian translation © Gerner József, 2023
Hungarian edition © Typotex, Budapest, 2023
Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

Lektorálta: Szegedi Péter

ISBN 978 963 493 264 2

Kedves Olvasó!
Köszönjük, hogy kínálatunkból választott olvasnivalót!
Újabb kiadványainkról, akcióinkról a www.typotex.hu
és a facebook.com/typotexkiado oldalakon értesülhet.

Typotex Kiadó
Alapította Votisky Zsuzsa, 1989
A kiadó az 1795-ben alapított Magyar Könyvkiadók
és Könyvterjesztők Egyesülésének tagja.
Felelős kiadó: Németh Kinga
Felelős szerkesztő: Szabó Mihály István
Tördelés: Madarász György
Borítóterv: Somogyi Péter
Nyomta és kötötte: OOK-PRESS Nyomda, Veszprém
Felelős vezető: Szathmáry Attila

TARTALOM

Prológus. Ne félj!	9
--------------------	---

Első rész KÍSÉRTETIES

1 Mi történik itt?	
Pillantás a kvantumvilágba	19
2 A mérész megfogalmazás	
Minimál kvantummechanika	34
3 Miért gondolná ezt bárki is?	
Hogyan jött létre a kvantummechanika	50
4 Nem ismerhetjük meg, mert nem létezik	
Határozatlanság és komplementaritás	75
5 Kétségek között	
Sok részecskéből álló rendszerek hullámfüggvényei	96

Második rész FELHASADÁS

6 Az univerzum felhasadása	
Dekoherencia és párhuzamos világok	115

7 Rend és véletlenszerűség	
Honnan ered a valószínűség?	134
8 Ettől az ontológiai elköteleződéstől kövérnek látszom?	
Szókratészi dialógus a kvantumrejtélyekről	156
9 Más utakon	
A sokvilág alternatívái	181
10 Az emberi oldal	
Élet és gondolkodás a kvantumuniverzumban	208

Harmadik rész

TÉRIDŐ

11 Miért van a tér?	
Emergencia és lokalitás	231
12 A rezgések világa	
Kvantumtérelmélet	247
13 Légüres térben levegőt venni	
A gravitáció felfedezése a kvantummechanikában	265
14 Túl téren és időn	
Holográfia, fekete lyukak és a lokalitás határai	288
Epilógus. Minden kvantum	305
Függelék. A virtuális részecskék története	309
Köszönetnyilvánítás	319
További olvasmányok	323
Hivatkozások és irodalom	325

*A történelem azon gondolkodóinak,
akik kitartottak a véleményük mellett
– a helyes okokból.*

PROLÓGUS

NE FÉLJ!

Nem kell elméleti fizikai doktorátussal rendelkezni ahhoz, hogy rettegjünk a kvantummechanikától. Azért nem is árt.

Ez különösnek tűnhet. A kvantummechanika a mikrovilágra vonatkozó legjobb elméletünk. Leírja, hogyan hatnak egymásra az atomok és más részecskék a természet erői révén, és hihetetlenül pontos kísérleti előrejelzésekre képes. Kétségtelen, hírhedten nehezen megérthető, rejtélyes, már-már az ördögösség határán mozog. Ám pont a hivatásos fizikusoknak aránylag könnyen meg kellene barátkozniuk egy ilyen elmélettel. Folyamatosan kvantumjelenséget is tartalmazó bonyolult számításokat végeznek, és óriási berendezéseket építenek, amelyek az így kapott előrejelzések tesztelésére hivatottak. Csak nem azt sugalljuk, hogy a fizikusok eközben mindvégig blöffölnek?

Nem, nem blöffölnek, de a fizikusok önmagukhoz sem teljesen őszinték. A kvantummechanika egyfelől a modern fizika szíve-lelke. Asztrofizikusok, részecskefizikusok, atomfizikusok, lézerfizikusok – mindenki használja a kvantummechanikát, sőt nagyon is jók benne. Nem csupán valami elvont kutatásról beszélünk. A kvantummechanika mindenütt jelen van a modern technológiában. A félvezető, a tranzisztor, a mikrocip, a lézer, a számítógép-memória működése mind-mind a kvantummechanikára támaszkodik. Egyébként a kvantummechanika elengedhetetlen akkor is, ha értelmet akarunk tulajdonítani a környező világ legalapvetőbb tulajdonságainak. A kémia egésze lényegében

a kvantummechanika gyakorlati alkalmazása. Ha meg akarod érteni, hogyan süt a nap, miért szilárd az asztal, a kvantummechanikához kell fordulnod magyarázatért.

Képzeletben csukd le a szemed. Remélhetőleg mindent sötétnek látsz. Ebben van ráció – vélhetnéd –, hiszen a szemedet nem éri fény. Ez azonban nem teljesen igaz; a látható féynél valamivel nagyobb hullámhosszú infravörös fényt folyamatosan bocsátja ki magából minden meleg test, a saját testünk is. Ha szemünk hasonlóan érzékeny lenne az infravörös fényre, mint a látható fényre, a szemgolyónk által kibocsátott fény miatt csukott szemmel is elvakulnánk. A szem receptorai, a csapok és a pálcikák azonban okosan csak a látható fényt érzékelik, az infravöröset nem. Hogy lehetséges ez? Végző soron a kvantummechanika adja meg a választ.

A kvantummechanika nem varázslat, hanem legmélyebb és legátfogóbb valóságképünk. Mai tudásunk szerint a kvantummechanika nem csupán az igazság egy közelítése: maga az igazság! Ez váratlan kísérleti eredmények esetén változhat, de eddig semmi nem utalt bármi ilyen meglepetésre. A kvantummechanika kidolgozása a 20. század elején kezdődött el, s olyan nevekhez köthető, mint Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger és Dirac. 1927-re körvonalazódott érett formája, amely bizonyosan az emberiség történetének egyik legnagyobb intellektuális teljesítménye. Minden okunk megvan a büszkeségre.

Másfelől azonban Richard Feynman emlékezetes mondata is megfelel a valóságnak: „Azt hiszem, nyugodtan állíthatom, hogy a kvantummechanikát senki sem érti.”¹ *Használjuk* a kvantummechanikát: segítségével fejlesztjük a technológiát, és megjósoljuk kísérleteink eredményét. Az őszinte fizikus azonban beismeri, hogy nem igazán értjük. Van egy receptünk, amely megbízhatóan alkalmazható bizonyos szituációkra, és elképesztően pontos jóslatokat ad, amelyeket aztán az adatok győzedelmesen beigazolnak. De ha mélyebbre ásunk, és megkérdezzük, mi is történik valójában – hát, egyszerűen nem tudjuk. A fizikusok hajlamosak esztelen robotként gondolni a kvantummechanikára, amelyre bizonyos feladatok megoldásában hagyatkozni lehet, nem pedig úgy, mint szeretett barátira, akiről szükség esetén személyesen gondoskodnának.

Ez a hozzáállás tetten érhető akkor is, amikor a szakemberek a szűken vett szakmainál tágabb közönségnek magyarázzák el a kvantummechanikát. Maradéktalanul megformált képet szeretnénk tálalni a természetről, de ezt nem igazán tudjuk megtenni, hiszen a fizikusok nem jutottak egyezsége a kvantummechanika értelmezését illetően. Ehelyett a népszerűsítés során hajlamosak vagyunk a kvantummechanika misztikus, zavarba ejtő, érthetetlen vonásait hangsúlyozni. Ez az üzenet ellentmond a tudomány alapelveinek, többek közt annak az elvnek is, mely szerint a világ alapjában véve megérthető. A kvantummechanikával kapcsolatban egyfajta mentális gát van bennünk, és szükségünk van egy kis kvantumterápiára, hogy túllépjünk rajta.

* * *

Amikor kvantummechanikát tanítunk az egyetemi hallgatóknak, egy szabálygyűjteményt kapnak. Egyes szabályok ismerős típusúak számukra: van egy matematikai leírás a kvantumrendszerekre, továbbá egy magyarázat az időbeli fejlődésükre. Ezután azonban egy csokor extra szabály következik, amelyeknek nincs megfelelőjük más fizikai elméletekben. Ezek az extra szabályok mondják meg nekünk, mi történik akkor, amikor egy kvantumrendszert *megfigyelünk*, s ez a viselkedés gyökeresen eltér a magára hagyott (nem megfigyelt) rendszer viselkedésétől. Hát mi folyik itt?

Alapjában véve két lehetőség van. Az egyik, hogy a hallgatóinknak feltálat történet sajnálatosan tökéletlen, és ahhoz, hogy a kvantummechanikát értelmes elméletnek minősíthessük, tisztáznunk kell, mit jelent a „mérés” vagy a „megfigyelés”, továbbá magyarázatot kell találni arra, miért viselkedik ilyenkor a rendszer máshogy, mint egyébként. A másik lehetőség, hogy a kvantummechanika durván letaszít bennünket arról az útról, amely mentén eddig fizikai gondolkodásunk haladt, eltérít attól a felfogástól, amely szerint a világ objektív módon, érzékelésünktől függetlenül létezik, s egy olyan útra visz, ahol a megfigyelés aktusa alapvetően befolyásolja a valóság természetét.

Bárhogy is van, a tankönyvekben teret és időt kellene szentelni e lehetőségek feltárására, és beismerni, hogy bár a kvantummechanika rend-

kívül hatékony eszköz, nem állíthatjuk, hogy kidolgozása befejeződött. Ez a beismerés nem történik meg. Többnyire csendben átsiklanak a kérdésem, inkább a fizikusok komfortzónájában időznek, egyenleteket írnak fel, s a hallgatókat ezeknek az egyenleteknek a megoldására ösztökélik.

Ez kínos! És egyre rosszabb lesz!

Az adott szituáció ismeretében azt gondolhatnánk, hogy a kvantummechanika megértése most a fizika legfontosabb, mondhatni egyedüli célja. Dollármilliókkal támogatják a kvantumelmélet alapjait kutatókat, briliáns elméket vonz a probléma, a legfontosabb felismeréseket díjakkal és elismeréssel honorálják. Az egyetemek versengenek a téma kiemelkedő személyiségeinek alkalmazásáért, mesés javadalmazással csábítják el őket a konkurenciától.

Sajnos nem így van! A kvantummechanika értelmezése nem tartozik a modern fizika magasan rangsorolt szakterületei közé; számos helyen alig respektálják, itt-ott egyenesen lenézik. A legtöbb fizikai intézetben egyetlen ember sem dolgozik ezen a problémán, s gyanúsan méregetik azokat, akik mégis ezt a kutatási területet választották. (Nemrég, miközben egy pályázatot írtam, azt a tanácsot kaptam, hogy koncentráljak gravitációelméleti és kozmológiai munkásságom ismertetésére, mert azt legitimnek tekintik, s inkább hallgassak a kvantummechanika megalapozásáról, mert az nem a megfelelő színben tüntet fel engem.) Az elmúlt kilencven évben fontos előrelépések történtek, ezek azonban jellemzően olyan makacs egyéniségek nevéhez fűződnek, akik fontosnak tartották a problémát, és nem törődtek kollégáik véleményével, vagy olyan fiatal egyetemi hallgatókhoz, akiknek nem volt jobb ötletük, s később végleg elhagyták ezt a területet.

Aiszóposz egyik meséjében a róka rátalál egy zamatos szőlőfürtre. Megpróbálja bekapni, de a fürt magasan van, a róka nem tud elég nagyot ugrani. Csalódottságában kijelenti, hogy a gyümölcs valószínűleg savanyú, egyébként sem vágyott igazából szőlőre. A róka a „fizikusokat” jelképezi, a szőlő pedig „a kvantummechanika megértését”. Számos fizikus döntött úgy, hogy a természet törvényeinek megértése soha nem volt igazán fontos; csak a konkrét előrejelzés képessége az, ami számít.

A tudóst arra nevelik, hogy kézzelfogható eredményeket értékeljen, akár kísérleti felfedezésről, akár kvantitatív elméleti modellről van szó. Egy már ismert elmélet megértésén dolgozni, pláne, ha az talán nem is eredményez sajátos új technológiai megoldásokat vagy elméleti jóslatokat – ezt az ötletet nehéz eladni. A háttérben meghúzódó feszültségeket jól érzékelteti a *Drót (The Wire)* című tévésorozat, amelyben egy csoport szorgalmas detektív hónapokig tartó aprólékos munkával gyűjti a bizonyítékokat, hogy vádat emelhessenek egy drokartell ellen. Főnökeik eközben haszontalan időpocsékolásnak vélik piszmozgásukat. A következő sajtókonferenciáig az asztalon akarják látni a drogot; fejeket, letartóztatásokat követelnek beosztottaiktól. A pénzt biztosító hivatalok és az alkalmazásról döntő bizottságok olyanok, mint a rendőrfőnökök. Egy olyan világban, amelyben minden ösztönző a konkrét, mérhető eredmény felé terel, miközben a soron következő, közvetlen célunk felé rohanunk, félresöpörjük a kevésbé nyomasztó (a nagyobb összefüggésekkel kapcsolatos) aggodalmainkat.

* * *

Ennek a könyvnek három fő üzenete van. Az első, hogy a kvantummechanikának érthetőnek kellene lennie – még ha egyelőre nem is tartunk ott –, s ez kiemelten fontos célja kell hogy legyen a tudománynak. A kvantummechanika páratlan a fizikai elméletek sorában, amennyiben nyilvánvalóan különbséget tesz az *általunk látottak* és a *valóság* között. Ez különleges kihívást jelent a tudósok (és bárki más) elméjének, hiszen hozzászoktunk, hogy a látottakat minden további nélkül „realitásként” fogjuk fel, s ennek megfelelően adtunk magyarázatot a jelenségekre. Ám ez a kihívás nem leküzdhetetlen, és ha megszabadítjuk elménket bizonyos régimódi és intuitív gondolkodásmódoktól, rájövünk, hogy a kvantummechanika nem reménytelenül titokzatos vagy megmagyarázhatatlan. Ez csak fizika.

A második üzenet az, hogy a megértésben lényeges előrelépés történt. Arra a megközelítésre fogok koncentrálni, amelyet én a legígéretesebb útnak érzek, a kvantummechanika Everett-féle vagy sokvilág-

megfogalmazására.* A sokvilágnak egy csomó fizikus lelkes híve, de csekély tiszteletre tarthat igényt azok között az emberek között, akiket elrémít a saját maguk másolatait is tartalmazó realitások gondolata. Ha te is ilyen ember vagy, szeretnék legalább arról meggyőzni, hogy a sokvilág a kvantummechanika értelmezésének *legtisztább* útja – ide jutunk, ha a kvantumjelenségeket komolyan vesszük és a legkisebb ellenállás mentén haladunk. A több világ egyébként a már rendelkezésre álló formalizmusból adódik, nem valami légből kapott dolog. A sokvilág azonban nem az egyetlen elfogadható megközelítés, néhány versenytársát is meg fogjuk említeni. (Méltányosságra törekszem, bár nem feltétlenül kiegyensúlyozottságra.) Fontos, hogy a különféle megközelítések mind jól felépített tudományos elméletek potenciálisan eltérő kísérleti következményekkel, nem pedig zavaros „ötletek”, amelyeket igazi munkánk végeztével konyak és cigaretta mellett vitattunk meg egymás közt.

A harmadik üzenet az, hogy mindez számít, és nem csak a tudomány integritása miatt. A kvantummechanika megfelelő, de nem teljesen koherens keretrendszerének eddigi sikere nem tehet vakká bennünket arra a tényre, hogy bizonyos körülmények között ez a megközelítés egyszerűen nem elegendő. Különösen akkor, amikor magára a téridő természetére, valamint az univerzum eredetére és végső sorsára fordítjuk figyelmünket, a kvantummechanika alapjai hirtelen abszolút lényegessé válnak. Ismertetek néhány új, izgalmas és bevallottan csupán kísérleti jellegű javaslatot, amelyek meglepő kapcsolatokat rajzolnak

* A szerző könyvében a kvantummechanika ismertetése során elsősorban (de nem kizárólag) a kvantummechanikának arra a felfogására összpontosít, amelyet általában angolul „many-worlds interpretation (MWI)”-nak – magyarul: sokvilág-értelmezés – nevezünk. Véleménye szerint azonban itt (és más – általa kevésbé támogatott – alternatívák esetében is) nem valamiféle (esetleg filozófiai) értelmezésről van szó, hanem a kvantummechanika egy sajátos felépítéséről. Ezt a megformulázást ezért szinte mindig egyszerűen „Many-Worlds”-nek hívja. A szerzőnek ezt a szándékát a magyarban is vissza kívántuk adni, ezért legtöbbször mi is egyszerűen – a magyar szokásoknak inkább megfelelően, kisbetűvel – „sokvilág”-nak fordítottuk. A könyvben a „sokvilág” tehát tulajdonképpen a „kvantummechaniká”-t jelenti, de egy sajátos megfogalmazásban. (*A lektor*)

fel a kvantum-összefonódás és a téridő görbülete – azaz a „gravitáció” néven ismert jelenség – között. A gravitáció teljes és meggyőző kvantumelméletének megalkotása sok-sok éve fontos tudományos célként lebeg a szemünk előtt (presztízs, díjak, tehetségek elcsábítása stb.). Talán az lesz a titok nyitja, hogy nem a gravitációnál kell kezdeni és azt „kvantálni”, hanem mélyebbre kell ásunk magunkat a kvantummechanikába, s akkor rájövünk, hogy a gravitáció mindvégig benne rejtőzött.

Nem tudunk biztosat! Az izgalom és a szorongás az élvonalbeli kutatás velejárója. De itt az ideje, hogy a valóság alapvető természetét komolyan vegyük, s ez azt jelenti, hogy szembe kell néznünk a kvantummechanikával.

ELSŐ RÉSZ

KÍSÉRTETIES

1

MI TÖRTÉNIK ITT?

PILLANTÁS A KVANTUMVILÁGBA

Albert Einstein, aki éppolyan jól bánt a szavakkal, mint az egyenletekkel, olyan címkét ragasztott a kvantummechanikára, amely a mai napig nem kopott le róla; *spukhaft* – mondta ő –, s ezt a jelzőt „kísérteties”-nek szokás fordítani. Ha mást nem is, ezt a benyomást magunk is átélhetjük a kvantummechanikáról szóló nyilvános viták hallatán. Azt sugallják, hogy a kvantummechanika a fizika megkerülhetetlenül misztikus, furcsa, bizarr, felfoghatatlan, különös, zavarba ejtő fejezete. Egyszóval kísérteties!

A kiismerhetetlen mindig vonzó. Mint egy titokzatos, szexi idegen, arra csábít bennünket a kvantummechanika, hogy olyan tulajdonságokat és képességeket vetítsünk rá, amelyekkel talán nem is rendelkezik. Egy gyors keresés a címükben a „kvantum” szót tartalmazó könyvekre a következő listát adta ki az állítólagos alkalmazásokról:

Kvantumsiker

Kvantumvezetés

Kvantumtudat

Kvantumérintés

Kvantumjóga

Kvantumétkezés

Kvantumpszichológia

Kvantumelme

Kvantumdicsőség
Kvantumfeloldozás
Kvantumteológia
Kvantumboldogság
Kvantumköltészet
Kvantumtanítás
Kvantumhit
Kvantumszeretet

A fizika olyan ága számára, amelyre gyakran úgy tekintenek mint csupán a szubatomi részecskék részvételével zajló mikroszkopikus folyamatok elméletére, ez elég imponáló összegzés.

Tárgyilagosan nézve a kvantummechanika – vagy „kvantumfizika” vagy „kvantumelmélet”: ezek az elnevezések csereszabatosak – nem csak a mikroszkopikus folyamatokra érvényes. Az egész világot írja le, téged, engem, a csillagokat, a galaxisokat, mindent a fekete lyukaktól a világegyetem kezdetéig. De csak szélsőséges közelképben szemlélve a világot válik elkerülhetetlenül szembetűnővé a kvantumjelenségek látszólagos furcsasága.

E könyv egyik célja annak bemutatása, hogy a kvantummechanika nem szolgált rá a *kísérteties* jelzőre, amennyiben ez alatt kimondhatatlanul titokzatos, azaz az emberi felfogóképességen túlmutató dolgot értünk. A kvantummechanika *csodálatos*; eredeti, mélyenszántó, érdekfeszítő – a megszokottól nagyon különböző valóságszemlélet. A tudomány néha ilyen. De ha a vizsgálat tárgya bonyolultnak és rejtélyesnek tűnik, a rejtély megoldása a tudományos válasz, nem a színlelés, mely a probléma létét tagadja. Minden okunk megvan rá, hogy azt gondoljuk: a kvantummechanika esetében is képesek vagyunk megtalálni a helyes válaszokat, ahogy más fizikai elméletekkel korábban már megtettük.

A kvantummechanika bemutatása többnyire tipikus sémát követ. Először rámutatnak néhány meghökkentő kvantumjelenségre. Aztán hangot adnak amiatti zavaruknak, hogy a világ valószínűleg mégiscsak ilyen, majd lemondanak az értelmezéséről. Végül (ha szerencséd van) kísérletet tesznek valamiféle magyarázatra.

Célom, hogy az érthetőséget a misztérium elé helyezzem, ezért nem követem ezt a stratégiát. Olyan módon akarom tálalni a kvantummechanikát, mely azt az első lépéstől kezdve maximálisan érthetővé teszi. Továbbra is idegenszerűnek fog tűnni az olvasó számára – de mit tegyünk, ilyen a vadállatok természete. Felfoghatatlannak és értelmetlennek azonban – remélhetőleg – már nem fog látszani.

Nem törekszünk arra, hogy a történeti utat járjuk be. Ebben a fejezetben sorra vesszük azokat az elemi kísérleti tényeket, amelyek ránk kényszerítik a kvantummechanikát, aztán a következőben gyorsan fel fogjuk vázolni a sokvilágot azért, hogy értelmet adjunk az említett kísérleti tényeknek. Csak a rákövetkező fejezet ad félig-meddig történeti leírást a felfedezésekről, amelyek a fizikusokat arra ösztönözték, hogy fontolóra vegyék, érdemes és szükséges-e egy ilyen drámaian újszerű elméletet a fizika homlokterébe helyezni. Ezután tüzetesen, mintegy nagyító alá helyezve fogjuk megvizsgálni, mennyire drámai valójában a kvantummechanika némely következménye.

Miután mindez a helyére került, a könyv további részében érdekes feladatnak látunk neki: megnézzük, hova vezet mindez – demisztifikáljuk a kvantumvalóság legvitatottabb sajátosságait.

* * *

A fizika a legalapvetőbb tudományok egyike, sőt az egyik legalapvetőbb emberi törekvés. Körbenézünk a világban, s azt látjuk, tele van anyaggal. Mi ez az anyag, és hogyan viselkedik?

Ezek a kérdések már akkor felmerültek, amikor az ember képessé vált a kérdésfeltevésre. Az ókori görögök a mozgás és változás általános tanának tartották a fizikát, legyen szó akár élő, akár élettelen anyagról. Arisztotelész tendenciákról, célokról, okokról beszél. Valamely entitás mozgása és változása belső természetére és a rá ható külső erőkre hivatkozva értelmezhető. A tipikus tárgyak például természetüknél fogva nyugalomban lehetnek; annak érdekében, hogy mozogni kezdjenek, szükség van valamilyen okra.

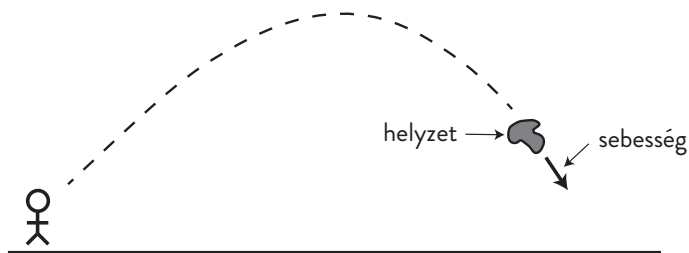
Mindez egy Isaac Newton nevű okos fickónak köszönhetően változott meg. 1687-ben tette közzé a *Principia Mathematicát*, a legfonto-

sabb művet a fizika történetében. Ebben a könyvben alapozta meg azt a tudományt, amit ma „klasszikus” vagy egyszerűen „newtoni” mechanikának hívunk. Newton félresöpörte a dolgok természetéről és rendeltetéséről lamentáló ködös dumát, s megmutatta, mi van mögötte: egy szigorú és pontos matematikai formalizmus, amellyel a tanárok azóta is nap mint nap gyötrik tanítványaikat.

Legyenek bármilyen személyes emlékeid a közép- vagy főiskolai – az ingákról és lejtőkről szóló – házi feladatokról, a klasszikus mechanika alapfogalmai meglehetősen egyszerűek. Vegyünk egy kődarabot. Hagyjuk figyelmen kívül mindazt, ami egy geológust érdekelne: a kő színét, összetételét. Tegyük félre azt a lehetőséget is, hogy a kő alakja változhat – például, ha kalapáccsal darabokra törjük. Képzletben csupaszítsunk le a kődarabról minden tulajdonságot, mígnem csupán egy absztrakt forma áll előttünk: a kő egy tárgy, ez a tárgy *a térben meghatározott helyet* foglal el, s ez a hely *az időben változik*.

A klasszikus mechanika pontosan megmondja nekünk, hogy a kő helyzete hogyan változik az időben. Ezt ma már természetesnek vesszük, de érdemes eltöprengeni azon, mennyire lenyűgöző ez az ismeret. Newton nem homályos közhelyekkel traktál bennünket általános tendenciákról, hogy a kövek többé-kevésbé így vagy úgy mozognak. Egzakt, áthághatatlan szabályokat ad, amelyek a világegyetem összes tárgyának minden más általi mozgatására igazak, a baseball-labda elkapásakor éppúgy alkalmazhatóak, mint egy jármű Marsra való leszállítására.

Lássuk, hogy megy ez a gyakorlatban! A kőnek minden pillanatban meghatározott helyzete és meghatározott sebessége is van – a sebesség a mozgásának ütemét, gyorsaságát jellemzi. Ha a kőre nem hatnak erők, Newton szerint örök időkre egyenes vonalban, állandó sebességgel fog mozogni. (Már ez is nagy eltérés az arisztotelészi felfogástól, amely szerint a tárgyakat folyamatosan tolnod kell, ha azt akard, hogy mozgásban maradjanak.) Ha a kőre erő hat, az gyorsulást okoz – változást a kő sebességében, lehet, hogy lassabban fog haladni, lehet, hogy gyorsabban, de az is lehet, hogy csak a mozgásának iránya változik meg –, s ez a gyorsulás egyenesen arányos az alkalmazott erő mértékével.



Lényegében erről van szó. Ahhoz, hogy a kő teljes pályáivét kiszámítsam, meg kell adnod a helyzetét, a sebességét, és hogy milyen erők hatnak rá. A többit elintézik Newton egyenletei. Hatóerő lehet a gravitáció, vagy a karod ereje, amikor felkapod és elhajítod a követ, vagy a talaj ellenállása, amikor a kő földet ér. Az elgondolás egyformán jól működik biliárdgolyóra, űrhajóra, bolygóra. A fizika – e klasszikus paradigmán belüli – programja lényegében annyi, hogy megfejtse, mi alkotja a világegyetem anyagát (kövek és hasonló), és milyen erők hatnak erre az anyagra.

A klasszikus fizika egyszerű képet ad a világról, de felépítése során számos fontos előrelépés történt. Vegyük észre, hogy ha ki akarjuk számolni, mi fog történni a kővel, a szükséges információk – helyzet, sebesség, erők – megadásában konkrét adatokra van szükség. Az erők a külvilághoz tartoznak, magára a kőre vonatkozó információ hordozói csupán a helyzet és a sebesség. Ellenben a kő adott időponthoz tartozó gyorsulását már nem kell megadnunk; a Newton-törvények lehetővé teszik, hogy azt a helyzetből és a sebességből kiszámítsuk.

A klasszikus mechanikában a helyzet és a sebesség együttese alkotja az objektum *állapotát*. Ha rendszerünk több, mozgást végző részből áll, a teljes rendszer klasszikus állapota egyszerűen az egyes részek állapotainak listája. Egy szokványos méretű teremben a levegőben mintegy 10^{27} különféle molekula lehet, s a levegő állapotát egy olyan lista írja le, amely minden egyes molekula helyzetét és sebességét tartalmazza. (Pontosabban a fizikában a sebesség helyett inkább az impulzust használjuk, de a newtoni mechanikában az impulzus egyszerűen a tömeg

és a sebesség szorzata.) A rendszer által felvehető lehetséges állapotok összességét *fázistér*nek nevezzük.

Pierre-Simon Laplace francia matematikus mutatott rá a klasszikus mechanika egy mélyenszántó következményére. Egy óriási értelem elvileg a szó szoros értelmében ismerheti az univerzum valamennyi objektumának állapotát, s ebből levezethet minden jövőbeli eseményt, ahogy azt is, ami a múltban megtörtént. A *Laplace-démon* gondolat-kísérlet, nem egy ambiciózus számítógéptudós realiztikus terve, de e gondolat-kísérlet következményei messzire vezetnek. A newtoni mechanika determinisztikus, óraműszerű univerzumot ír le.

A klasszikus fizika gépezete oly szép és ellenállhatatlan, hogy ha egyszer megragadott, megkerülhetetlennek látod. A Newton után következő nagy gondolkodók közül sokan meg voltak győződve arról, hogy a fizika felépítménye teljes, s a jövő feladata kimerül abban, hogy kiszámoljuk, a klasszikus fizika melyik realizációja (milyen részecskék és milyen erők) alkalmas az univerzum egészének leírására. Még a relativitáselmélet is – amely a maga módján megrengette a fizika világát – inkább a klasszikus mechanika egy változatának tekinthető, mintsem helyettesítőjének.

Aztán színre lépett a kvantummechanika, és minden megváltozott.

* * *

A klasszikus mechanika newtoni megfogalmazása mellett a kvantummechanika jelenti a fizika történetének másik nagy forradalmát. Az összes korábbi elmélettől eltérően a kvantumelmélet nem a klasszikus keretek között javasolt egy konkrét új fizikai modellt; teljes egészében szakított ezzel a kerettel, s valami gyökeresen eltérővel helyettesítette.

A kvantummechanika alapvetően új eleme, amely világosan megkülönbözteti elődjétől, hogy a *mérés* fogalmára összpontosít: mit jelent megmérni a kvantumrendszer valamely tulajdonságát. Pontosan mi a mérés, mi történik, amikor megmérünk valamit, és mindez mit árul el nekünk arról, ami a színpalak mögött valójában történik: ezeket a kérdéseket együttesen a *kvantummechanikai mérés problémájának* ne-

vezzük. Bár van néhány ígéretes elképzelés, a fizikában és a filozófiában jelenleg teljes az egyet nem értés a mérésprobléma megoldásáról.

A mérésprobléma megoldására irányuló kísérletek vezettek el annak a területnek a kialakulásához, amely a *kvantummechanika értelmezése* néven ismert – bár ez a megjelölés nem valami pontos. Az „értelmezés” szót inkább irodalmi vagy művészeti alkotások vonatkozásában használjuk, amikor minden ember mást-mást gondol ugyanarról a műről. A kvantummechanikában valami másról van szó: valóban különböző tudományos elméletek versengéséről, a fizikai világ értelmezésének egymással összeegyeztethetetlen módozatairól. Ez az oka annak, hogy a területen dolgozó szakértők inkább „a kvantummechanika alapjairól” beszélnek. A kvantummechanika alapjainak témája a tudomány része, nem irodalomkritika.

Soha senki nem érezte szükségét annak, hogy „a klasszikus mechanika értelmezéseiről” beszéljen – a klasszikus mechanika tökéletesen átlátható. Létezik egy matematikai formalizmus, amely a helyzet, a sebesség és a pálya fogalmát használja, és láss csodát: ott az a kódarab a formalizmus által megjósolt módon viselkedik. A klasszikus mechanikában főképp nincs mérési probléma. A rendszer állapotát a helyzete és a sebessége adja meg, s ha mérni akarjuk ezeket a mennyiségeket, hát egyszerűen csak megmérjük. Előfordulhat természetesen, hogy hanyagul vagy durván mérünk, ami pontatlan eredményt okoz, vagy a rendszer megváltozásával jár együtt. Ez azonban nem szükségszerű: járjunk el gondosan, s akkor pontosan meg tudunk mérni mindent, amit tudni akarunk a rendszerről, anélkül, hogy észrevehető módon megváltoztatnánk.

A kvantummechanika – minden sikere ellenére – nem szolgál ilyen lehetőséggel. A kvantumvalóság rejtélyének lényege egyszerű mottóval foglalható össze: amit mi *látunk* a világból, gyökeresen eltérőnek látszik attól, amilyen az *valójában*.

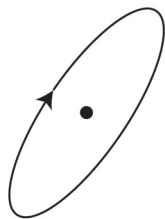
* * *

Vegyük szemügyre az elektronokat, az atommag körül keringő elemi részecskéket, amelyeknek kölcsönhatásai adják ki a kémia egészét,

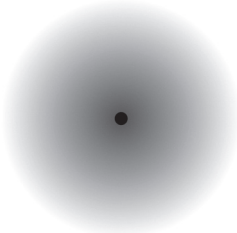
ennélfogva szinte mindent, ami a környezetünkben érdekes. Ahogy azt a kődarabbal tettük, itt is eltekinthetünk az elektron néhány tulajdonságától, mint a spin vagy az a tény, hogy elektromos tere van. (Maradhatnánk a kő példájánál, hiszen az elektronokhoz hasonlóan a kavicsok is kvantumrendszerek, de a szubatomi részecskékre váltás emlékeztet bennünket arra, hogy a kvantummechanika megkülönböztető jellegzetességei csak akkor válnak nyilvánvalóvá, ha tényleg nagyon kicsi objektumokat vizsgálunk.)

A klasszikus mechanikával ellentétben – ahol a rendszer állapotát a helyzetével és a sebességével írjuk le – a kvantumrendszerek jellege picit kevésbé konkrét. Vizsgáljunk meg egy elektront a maga természetes környezetében, amint egy atommag körüli pályán kering. A „pálya” és „kering” szavakból, valamint az évek során kétségkívül általad is számtalanszor látott rajzfilmes atomábrázolás alapján joggal vélekedhetsz úgy, hogy egy elektron pályája többé-kevésbé a Nap körül keringő bolygók pályájához hasonló. Az elektronnak (gondolhatnád) van helyzete és sebessége, s ahogy telik az idő, kör- vagy ellipszispályán suhan a központi mag körül.

A kvantummechanika valami mást állít. Meg tudjuk *mérni* a hely vagy a sebesség értékeit (bár nem egyszerre), és ha elég gondos és tehetséges kísérletezők vagyunk, valamilyen választ is kapunk. Ám amit egy ilyen mérés mutat, az nem az elektron tényleges, teljes, kendőzetlen állapota. Valójában az így kapott mérési eredményt nem tudjuk tökéletesen megbízhatóan megjósolni, ami jelentősen eltér a klasszikus



klasszikus
elektronpálya

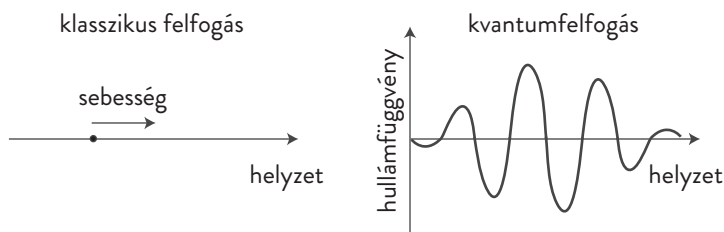


kvantumelektron
hullámfüggvénye

mechanika szellemétől. A legtöbb, amit tehetünk, hogy annak *valószínűségét* jósoljuk meg, hogy az elektront egy konkrét helyen vagy egy konkrét sebességgel észleljük.

Egy részecske állapotának, azaz „helyzetének és sebességének” fogalmát tehát a kvantummechanikában valami olyasmi váltja fel, ami teljesen idegen a köznapi tapasztalatainktól: a valószínűség felhője. Az atombeli elektron esetében ez a felhő sűrűbb a középpont felé haladva, attól távolodva pedig egyre ritkább. Ahol ez a felhő a legsűrűbb, ott a legnagyobb az elektron megtalálásának valószínűsége; ahol már szinte észrevehetetlenül átlátszó, ott elenyészően kis valószínűséggel láthatjuk az elektront.

Ezt a felhőt gyakran *hullámfüggvénynek* nevezik, mert hullám módjára képes oszcillálni, ahogy a legvalószínűbb mérési eredmény az időben változik. A hullámfüggvényt általában egy görög nagybetűvel, a Ψ -vel jelöljük. A hullámfüggvény minden lehetséges mérési eredményhez – például a részecske helyzetéhez – hozzárendel egy konkrét számot, amit az adott mérési eredményhez tartozó *amplitúdónak* nevezünk. Ennek amplitúdóját, hogy a részecske valamely x_0 helyzetet foglal el, például $\Psi(x_0)$ -al jelölhetjük.



Annak valószínűségét, hogy a kísérletet elvégezve épp az adott eredményt kapjuk, az amplitúdó négyzete adja meg.

$$\begin{aligned} \text{Egy bizonyos eredmény valószínűsége} &= \\ &= |\text{az eredmény amplitúdója}|^2 \end{aligned}$$

Ezt az egyszerű összefüggést Max Born fizikus tiszteletére *Born-szabálynak* nevezzük.* Feladatunk részben az lesz, hogy kiókumláljuk, honnan eredhet ez a szabály.

Bizonyosan *nem* mondjuk, hogy van egy valamilyen helyzettel és sebességgel rendelkező elektron, csak nem tudjuk, hogy mik ezek, és így az ezekkel a mennyiségekkel kapcsolatos tudatlanságunk fejeződik ki a hullámfüggvényben. Ebben a fejezetben egyáltalán semmit nem fogunk mondani arról, hogy mi „van”, csak arról beszélünk, amit megfigyelünk. A következő fejezetekben, az asztalt verve, ragaszkodom ahhoz, hogy a hullámfüggvény a valóság teljessége, s az olyan fogalmak, mint az elektron helyzete és sebessége, csupán mérhető mennyiségek. Azonban nem mindenki látja így a dolgot, s egyelőre felvesszük a tárgyilagosság maszkját.

* * *

Helyezzük egymás mellé a klasszikus mechanika és a kvantummechanika szabályait, és hasonlítsuk össze őket. Egy klasszikus rendszer állapotát a rendszer elemeinek helyzete és sebessége adja meg. A rendszer fejlődésének követését valami ilyesmi folyamatként képzeljük el:

* Van egy technikai apróság, amelyről itt említést teszünk, de rögtön el is felejtethed. Bármely adott eredmény amplitúdója egy komplex, azaz nem valós szám. Valós számok azok, amelyek a számegyeneset alkotják, a mínusz végtelen és a plusz végtelen közötti összes szám. Valahányszor egy valós szám négyzetét veszed, mindig egy újabb valós számot kapsz, amely nagyobb vagy egyenlő nullával. A valós számok vonatkozásában tehát nem fordulhat elő egy negatív szám négyzetgyöke. A matematikusok már rég felismerték, hogy nagyon hasznos lenne valami ilyen dolog, így hát definiálták az *i* „képzetes (imaginárius) egységet”, mint olyan számot, amely a -1 négyzetgyöke. A képzetes szám egy „képzetes résznek” nevezett valós szám és az *i* szorzata. A komplex szám egy valós szám és egy képzetes szám kombinációja. A Born-szabályban szereplő függőleges vonalkák valójában azt jelentik, hogy összeadjuk a valós és a képzetes részt. Mindezt csak a szőrszálhasogatók kedvéért részleteztük; mostantól boldogan fogjuk kijelenteni, hogy „a valószínűség az amplitúdó négyzete”, és ezzel lezárjuk a dolgot.

A klasszikus mechanika szabályai

1. Adjuk meg a kezdeti feltételeket azzal, hogy konkrét helyzetet és sebességet rendelünk a rendszer valamennyi eleméhez.
2. Kövessük nyomon a rendszer változását Newton mozgástörvényeinek alkalmazásával.

Ez minden. Az ördög, természetesen, a részletekben rejlik. Egyes klasszikus rendszerek rengeteg alkotóelemből állnak, amelyek mindegyike mozog.

Ezzel ellentétben az irányadó kvantummechanikai tankönyvekben a szabályok két részre oszlanak. Az első részben egy olyan struktúrával ismerkedünk meg, amely tökéletes párhuzamba állítható a klasszikus esettel. A kvantumrendszert azonban nem a hely és a sebesség, hanem a hullámfüggvény írja le. Éppúgy, ahogy a klasszikus rendszer állapotának fejlődését Newton mozgástörvényei írják le, létezik egy egyenlet, amit *Schrödinger-egyenlet*nek nevezünk, amely a hullámfüggvény időbeli változását adja meg. A Schrödinger-egyenletet a következő szavakkal jellemezhetjük: „a hullámfüggvény változásának mértéke arányos a kvantumrendszer energiájával”. Kicsit konkrétan: a hullámfüggvény egy sor lehetséges energiát ábrázol, és a Schrödinger-egyenlet azt mondja, hogy a hullámfüggvény nagy energiájú részei gyorsan, míg az alacsony energiájú részei nagyon lassan fejlődnek. Aminek, ha meggondoljuk, van is értelme.

Számunkra csupán annyi a lényeg, hogy van egy egyenlet, amely megmondja, időben hogyan változik a hullámfüggvény. Ez a változás ugyanúgy megjósolható, és ugyanolyan elkerülhetetlen, mint a klasszikus mechanika Newton-törvényeit követő testek mozgása. Ebben nincs semmi hátborzongató.

A kvantummechanika receptje valahogy így kezdődik:

A kvantummechanika szabályai (első rész)

1. Adjuk meg a kezdeti feltételeket egy konkrét Ψ hullámfüggvénnyel.
2. Írjuk le a rendszer változását a Schrödinger-egyenlet segítségével.

Eddig rendben volnánk – a kvantummechanikának ez a része pontos megfelelője elődjének. Amíg azonban a klasszikus szabályai itt meg is állnak, a kvantummechanika továbblép.

Minden további szabály a méréssel kapcsolatos. Amennyiben végrehajtasz egy mérést, például egy részecske helyzetének vagy spinjének meghatározása céljából, a kvantummechanika azt mondja, hogy mindig csak bizonyos lehetséges eredményekre juthatsz. Nem tudod megjósolni, hogy mi lesz az eredmény, de ki tudod számolni valamennyi megengedett eredmény valószínűségét. És miután a mérést elvégezted, a hullámfüggvény összeomlik, az épp megfigyelt mérési eredménytől függően teljesen más függvény lesz belőle, az épp kapott eredmény körül koncentrálódó teljesen új valószínűségekkel. Vagyis ha mérést hajtasz végre egy kvantumrendszeren, a legtöbb, amit tehetsz, hogy megjósolod a lehetséges eredmények valószínűségét, de ha azonnal újra megmérned ugyanezt a mennyiséget, mindig ugyanazt a választ kapnád – a hullámfüggvény ugyanarra a kimenetelre omolna össze.

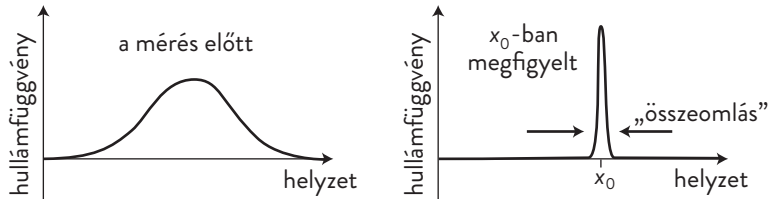
Következzenek hát a rusnya részletek:

A kvantummechanika szabályai (második rész)

3. Vannak bizonyos megfigyelhető mennyiségek, például a helyzet, amelyek közül választhatunk, hogy melyiket kívánjuk megmérni. Amikor a mérést elvégezzük, határozott eredményt kapunk.
4. Annak valószínűségét, hogy egy adott eredményt kapunk, a hullámfüggvényből lehet kiszámítani. A hullámfüggvény minden

lehetséges mérési eredményhez egy amplitúdót rendel; bármely eredmény valószínűsége az amplitúdó négyzetével egyenlő.

- Méréskor a hullámfüggvény összeomlik. Bármennyire szétterült is legyen a mérés előtt, a mérés után a megfigyelt eredmény körül koncentrálódik.



Egy modern egyetemi tananyagban, amikor a fizikushallgatók először találkoznak a kvantummechanikával, ilyen vagy olyan formában ezt az öt szabályt tanítják nekik. Az ilyen előadáshoz – amely a mérést tekinti alapvetőnek, a hullámfüggvény összeomlását a megfigyelés következményének tartja, és nem kérdezősködik az után, hogy mi zajlik valójában a színpalak mögött – kapcsolódó ideológiát olykor a kvantummechanika *koppenhágai értelmezésének* nevezik. Az emberek, beleértve koppenhágai fizikusokat, akik állítólag rész vettek ennek az értelmezésnek a kidolgozásában, nem teljesen értenek egyet abban, hogy mit is takar ez az elnevezés. Mi egyszerűen csak „a szokásos tankönyvi kvantummechanikaként” hivatkozunk rá.

Az az elgondolás, hogy ezek a szabályok a valóság tényleges leírására alkalmasak – mondanom sem kell – felháborító.

Pontosan mit értünk „mérésen”? Milyen gyorsan történhet meg a mérés? Pontosán mi alkotja a mérőberendezést? Szükséges-e hozzá emberi részvétel, valamennyi tudatosság, vagy talán az információ kódolásának képessége? Esetleg csak makroszkopikus méretűnek kell lennie a mérőberendezésnek, s ha igen, akkor mekkorának? Pontosán mikor zajlik le a mérés, és milyen gyorsan? Hogy az ördögbe képes a hullámfüggvény ilyen drámai összeomlásra? Amennyiben a hullámfüggvény nagyon szétterült, az összeomlás a fénysebességnél gyorsabban is bekövetkezhet? És mi történik mindazokkal a lehetőségekkel,

amelyek a hullámfüggvény szerint látszólag megengedettek, de nem figyeljük meg őket? Valójában soha nem is voltak ott? Csak eltűntek a semmibe?

Fogalmazzunk élesen: Miért viselkednek a kvantumrendszerek folytonosan és determinisztikusan, a Schrödinger-egyenletnek megfelelően *addig, amíg nem nézünk rájuk*, és miért omlanak össze drámai módon, amint rájuk tekintünk? Honnan szereznek erről tudomást, és miért törődnek vele? (Ne aggódj, ezekre a kérdésekre választ fogunk adni!)

* * *

A legtöbb ember úgy gondolja, hogy a tudomány a természet megértésére törekszik. Megfigyeljük a természetben zajló történéseket, és a tudomány abban bízunk, hogy magyarázatot tud adni a történésekre.

A jelenlegi tankönyvi megfogalmazásban a kvantummechanika letett erről az ambícióról. Nem tudjuk, mi történik, vagy legalábbis a fizikustársadalom képtelen egyezsége jutni a kérdésben. Ehelyett van egy *receptünk*, amelyet gondosan beteszünk a tankönyveinkbe, és ezt tanítjuk a tanítványainknak. Csupán a kezdőpozíció és a sebesség ismeretében Newton megmondta neked, hogy a Föld gravitációs terében általad elhajított kavicsnak milyen lesz a pályája. Hasonlóképpen: egy meghatározott módon előkészített kvantumrendszerből kiindulva a kvantummechanika képes megmondani, hogyan viselkedik a hullámfüggvény az idő múlásával, és mi a valószínűségük a lehetséges mérési kimeneteknek, ha a rendszer megfigyelése mellett döntenél.

Az a tény, hogy a kvantumrecept bizonyosság helyett csupán valószínűségekkel szolgál, zavaró lehet ugyan, de együtt lehet vele élni. Ami igazán bosszantó, vagy annak kéne lennie, az az, hogy nem értjük, valójában mi is történik.

Képzeld el, hogy néhány fondorlatos lángelme a fizika összes törvényére ráébred, de ahelyett, hogy az egész világ tudtára adnák, készítenek egy számítógépes programot konkrét fizikai problémákra vonatkozó kérdések megválaszolására, és hozzá egy interfészt egy weboldalon.

Az érdeklődőknek csak rá kell keresniük az oldalra, begépelni egy jól feltett fizikai kérdést, s arra rögtön meg is kapják a helyes választ.

Egy ilyen program nyilván közkedvelt lenne a tudósok és a mérnökök körében. Ám a weboldalra csatlakozás lehetősége még nem lenne alkalmassá bennünket a fizikai törvények megértésére. Lenne egy orákulumunk, amelynek az a dolga, hogy konkrét kérdésekre választ adjon, nekünk magunknak azonban fogalmunk sem lenne a játék alapszabályairól. A világ többi tudósa egy ekkora ajándék birtokában sem hirdethetné ki a győzelmet; folytatnák a természettörvények megismerését célzó munkájukat.

A kvantummechanika, abban a formában, ahogyan jelenleg a tankönyvekben tálalva van, egy orákulumot képvisel, nem a valódi megértést. Felvethetünk konkrét problémákat, és megkapjuk rájuk a választ, de – őszintén szólva – nem tudjuk elmagyarázni, mi folyik a színpalak mögött. Amink van, az egy sor kitűnő elképzelés, és itt az idő, hogy a fizikustársadalom elkezdje komolyan venni őket.

2

A MERÉSZ MEGFOGALMAZÁS

MINIMÁL KVANTUMMECHANIKA

„Fogd be a szád, és számolj!”² – N. David Mermin fizikus tömören így summázza azt a hozzáállást, amelyet a modern kvantummechanika-tankönyvek belenevelnek a fiatal hallgatókba. Mermin nem helyesli ezt az álláspontot, mások azonban igen. Minden tisztességes fizikus jó sok időt tölt el számolással, függetlenül attól, hogy mi a felfogása a kvantummechanika alapjairól. Így Mermin intelme egyszerűen és röviden: „Fogd be a szád”.*

Nem volt ez mindig így. A kvantummechanika összerakása évtizedeket vett igénybe, modern formáját 1927 táján öltötte fel. Abban az évben, az Ötödik Nemzetközi Solvay-konferencia alkalmából a világ legjobb fizikusai jöttek össze Belgiumban, hogy a kvantumelmélet helyzetét és jelentőségét megvitassák. A kísérleti bizonyítékok addigra nyilvánvalóak voltak, s a fizikusok végre-valahára a kvantummechanika kvantitatív megfogalmazásának is birtokába jutottak. Eljött az ideje,

* Ha körülnézel az interneten, látni fogod, hogy a „Fogd be a szád, és számolj!” felszólítást sokan Richard Feynman fizikusnak tulajdonítják, aki mindig is a bonyolult számítások nagymestere volt. Ő azonban soha nem mondott ilyet, és nem is értett volna egyet ezzel a véleménnyel. Nagyon sokat gondolkodott a kvantummechanikán, és aligha vádolhatta meg bárki is azzal, hogy befogta a száját. Az idézetek gyakori sorsa, hogy olyan embereknek tulajdonítják őket, akik ismertebbek az eredeti forrásnál. Robert Merton szociológus Máté-hatásnak nevezte ezt a jelenséget Máté evangéliumának egyik sorára utalva: „Akinek van, annak még adnak, hogy bőségesen legyen neki, de akinek nincs, attól még azt is elveszik, amije van.” (Máté 13,12)