

SEAN CARROLL

A MÉLYEN ELREJTETT VALÓSÁG

SEAN CARROLL

A MÉLYEN ELREJTETT VALÓSÁG

Kvantumvilágok és a téridő
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 mikrocsip, 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.

Képzletben 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 szemgolyóink 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. Maradékaltalun megformált képet szeretnénk tálalni a természetről, de ezt nem igazán tudjuk megtenni, hiszen a fizikusok nem jutottak egyezésre 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 egyetemes 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 ismeretetésére, 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 pizsmogásukat. 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 megszábadítjuk 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 elérmit 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 „kvantummechanika”-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.