

Carlo Rovelli: *Helgoland – Hogyan változtatta meg világmépünket a kvantumelmélet* – Park Könyvkiadó, 2022; ISBN: 9789633557259

„Heisenberg, Born, Jordan és Dirac számítási sémája, az a különös gondolat, hogy csak arra szorítkozzunk, ami megfigyelhető, és hogy a fizikai változókat mátrixokkal helyettesítsük, soha nem bizonyult hibásnak.

Ez a világon az egyetlen alapvető elmélet, amely még nem tévedett – és amelynek nem ismerjük a határait.”

„Megfigyelhető? Mit törődik a Természet azzal, hogy megfigyeli-e valaki?”

„Úgy hallottam, hogy Einstein egyik kvantummechanika-előadássorozata után kijelentette tanítványainak: Ha megértettétek, akkor nem beszéltem világosan.”

(Christophe Galfard: Kezében az univerzum – a Szemle 2022/5 számában szoltunk róla.)

(Forrásmegadás nélküli idézetek a könyvből, kiemelések a recenzió szerzőjétől.)

Rovelli a tudományunk erejéről: „A klasszikus fizika fogalmi tisztaságát a kvantumok elsőpörték. A valóság nem olyan, amilyennek a klasszikus fizika leírja. Hirtelen ébredés volt ez abból a boldog álomból, amelybe a Newton sikeréből fakadt illúziók ringattak bennünket. De ez az ébredés vezet bennünket vissza a tudományos gondolkodás eleven lüktetéséhez: ez a gondolkodás nem csupa megszerzett bizonyosság, hanem folyamatos mozgás, s éppen az adja az erejét. Ez a gondolkodás nem megszerzett bizonyosságokból áll: ez állandó mozgás, ereje épp az a képessége, hogy mindig mindent kétségbe vonjon és újrakezdjen. Nem fél felforgatni a világrendet annak érdekében, hogy egy hatékonyabbat keressen, majd aztán mindent megint kétségbe vonjon és felforgasson. Hogy nem fél a világ újragondolásától, ez a tudomány ereje, amióta Anaximandrosz elvetette, hogy a Föld valami tartón nyugodna, hogy Kopernikusz hagyta bolygónkat keringeni az égen, hogy Einstein feloldotta a tér és idő geometriájának merevségét, hogy Darwin lerombolta az ember másságának válaszfalát. A valóság szakadatlanul, egyre hatékonyabb formákban rajzolódik újra. Lépésről lépésre megnyilatkozik mesés különössége és szépsége. A bátorság gyökeresen újáteremteti a világot: a tudománynak ez a lenyűgöző varázsa fogott meg először lázadó kamaszkoromban...”

Rovellit már ismerjük. A valóság nem olyan, amilyennek látjuk c. könyvéről az Iparjogvédelmi és Szerzői Jogi Szemle 2020/2. számában szoltunk. A Park-nál több további könyve is megjelent.

Róla: 2019-ben a nagy tekintélyű Foreign Policy magazin bevásárolta a 100 legbefolyásosabb globális gondolkodó közé (forrás: Centre de Physique Théorique).

A Park ajánlójából: „Bízást kijelenthetjük: az, ahogyan ma a világunkat értjük, egy mind ez idáig mélységesen rejtelmes elméleten alapul. Rovelli könyvében bámulatos tisztasággal rajzolódik ki a kvantumelmélet kialakulásának kalandos és ellentmondásos története. Ez a történet beleillik az új látásmódba, melyben a szubsztanciákból álló világot egy relációkból álló világ váltja fel, és a kapcsolódások kimeríthetetlen tükörjátékban felelgetnek egymás-

nak. Ez a látásmód elképesztő perspektívában mutat be mindent, és a még megválaszolatlan alapkérdések kutatására készítet bennünket.” *Rovelliről*: „Elméleti fizikus, kutatói munkássága mellett *küldetésének tekinti a tudomány népszerűsítését*, és közérthető, szellemes stílusát gyakran hasonlítják Richard P. Feynmanéhoz. A Hét rövid fizikalecke az utóbbi évek egyik legnagyobb olasz könyvsikere volt, több mint negyven nyelvre lefordították.” (A Park 2016-ban adta ki.)

A Google Books, és szintúgy a Penguin kiadó kiemeli, hogy „[a]zonnali Sunday Times-bestseller – a lázadás és a tudomány gyönyörű története. Az év könyvévé választották: The Times, Financial Times, Sunday Times, Guardian és Prospect.” A legutóbbiból idézik: „A tudomány népszerűsítése ritkán sikerül ennyire jól. Kápráztató mű korunk egyik legünnepebb fizikusától és mesteri történetmondójától. A Helgoland szédítő magasságokba visz, emlékeztetve bennünket az elme életének sok gyönyörűségére.”

A Penguin idézi a Financial Times recenziójából: „Rovelli napjaink legnagyobb fizika-népszerűsítője. Magyarázatainak világossága önmagában is elegendő, hogy győzelemmé (sic!) tegyék e könyvét. Ami még magasabbra emeli, az a mély emberségesség, amellyel a tárgyat kezeli. Olyan világban vagyunk, amelyet a tudomány nemhogy megfosztott volna a varázslatától, hanem még mágikusabbá tett.”

Goodreads: „Egy meglepő új pillantás a kvantumelméletre. Rovelli, a világ egyik legelismerettebb elméleti fizikusa, aki olvasók millióit bűvölte el a világmindenséget illető egyedi látásmódjával. A kvantumvilág, ahogy ő leírja, épp oly gyönyörű, amilyen nyugtalanító. A kvantummechanika tanulását egy csaknem pszichedelikus élménnyé teszi. Majd ismét változtat a nézőpontunkon, és letehetetlen utazásra visz a világmindenségen át, hogy jobban megérthessük a saját helyünket benne.”

„Volt egy pillanat, amikor úgy tűnt, sikerült tisztázni, hogyan működik a világ: a valóság mégoly változatos formáinak mélyén is mintha csupán néhány erő által vezérelt anyagrészecskék lennének. Az emberiség azt hitte, fellibbentette Májá fátylát: meglátta a valóság alapzatát. Az öröm azonban nem tartott sokáig: sok-sok tény vetett véget neki. Végül 1925 nyarán egy huszonhárom éves német fiatalember az Északi-tenger egyik széljárta szigetére, Helgolandra érkezett, hogy magányban töltse nyughatatlan napjait. Ott ötlött fel benne egy gondolat, amellyel számot lehetett adni minden makacsul ellenszegülő tényről, és meg lehetett alkotni a kvantummechanika, a „kvantumelmélet” matematikai szerkezetét. *Ez volt minden idők talán legnagyobb tudományos forradalma. Ezt a fiatalembert Werner Heisenbergnek hívták. Vele kezdődik történetünk.*

A kvantumelmélet tisztázta a kémia alapjait, az atomok, a szilárd testek és a plazma működését, megmagyarázta az ég színét, a neuronok működését agyunkban, a csillagok dinamikáját, a galaxisok eredetét... vagyis a világ ezernyi aspektusát. A kvantumelmélet az alapja a technikai fejlődésnek is a számítógépektől az atomerőművekig. Mérnökök, asztrofizikusok, kozmológusok, vegyészek és biológusok alkalmazzák nap mint nap. Alapjai már

bekerültek a középiskolák tanrendjébe is. És ez az elmélet soha nem bizonyult tévesnek! *Ez az elmélet a modern tudomány lüktető motorja. De mélységesen titokzatos is. És némiképp nyugtalanító.*

Szétzúzta a valóságról alkotott korábbi képünket – hogy az meghatározott röppályákon mozgó részecskékből állna –, de arról nem mondott semmit, hogyan kellene helyette elgondolnunk a világot. *A matematikája nem írja le a valóságot, nem mondja meg, 'mi van'.*

Mintha egymástól távol eső dolgok között bukkanna fel mágikus kapcsolat. *Az anyag helyére látomászerű valószínűségi hullámok lépnek.*

Akiben felmerül az a kérdés, hogy mit mond nekünk voltaképpen a kvantumelmélet a való világról, óhatatlanul elképed. *Einstein*, noha maga is megsejtette ezeket a gondolatokat, és elindította ezen az úton Heisenberget, *soha nem emésztette meg ezt.* Ahogyan *Richard Feynman*, a 20. század második felének nagy elméleti fizikusa írta: *senki sem érti a kvantumokat.* (Rájuk lentebb visszatérünk! – Osman P.)

Márpedig a tudomány éppen ez: felkutatni, hogyan lehet újféléképpen gondolkodni a világról. A tudományban egy lázadó és kritikus gondolat látnoki ereje működik, s képes önnön fogalmi alapjainak a megváltoztatására, és akár a nullpontról kiindulva is újrajzolhatja képünket a világról.

Az elméletnek ez a különössége egyfelől összezavar bennünket, másfelől meg új távlatokat nyit a valóság megértésében: ez a valóság sokkal árnyaltabb a térben keringő részecskék leegyszerűsítő anyagelvűségénél. *Ezt a valóságot mindenekelőtt relációk (viszonyok) alkotják, s nem objektumok (tárgyak).* ('Adjatok egy fix pontot, és én kifordítom sarkaiból a világot' – mondta Arkhimédész. A kvantummechanikában a közönséges halandó számára épp az a legnehezebben felfogható/elfogadható, hogy a valóság 'fix pont' helyett relációkban mutatja meg magát – Osman P.)

Az elmélet új utakat sugall a nagy kérdések újragondolásához, a valóság szerkezetétől kezdve a tapasztalás természetéig, s a metafizikától talán a tudat természetéig is. Minderről ma meglehetősen eleven vita folyik a tudósok és a filozófusok körében, és erről később mind beszélni fogok.

Helgoland szigetén *Heisenberg fátylat lebbentett fel köztünk és a valóság között, s a fátyol mögött nagy szakadék tátongott.* A könyvben elbeszélt történet ezen a szigeten kezdődik, ott, ahol *Heisenbergben megfogant az új gondolat; majd lépésről lépésre haladunk az egyre szélesebb körű kérdésfeltevések felé, amelyek mind a valóság kvantumszerkezetének felfedezése nyomán merültek fel.*

Az itt következő oldalakat elsősorban azoknak szántam, akik nem ismerik a kvantumfizikát, és szeretnék megérteni – már amennyire ember képes rá –, hogy mi az, és hogy mi következik belőle. A lehető legnagyobb tömörségre törekedtem; mellőztem minden olyan részletet, amely nem annyira fontos a kérdés lényegének megragadásához. A lehető legnagyobb érthetőségre törekedtem *egy olyan elméletről szólva, amely homályos tudományos kérdések középpontjában áll.* Jobbára nem is azt magyarázom, hogy miképpen érthetjük meg

a kvantummechanikát, hanem inkább csak azt, hogy miért annyira nehéz megértenünk. A végére nagyszámú jegyzet került: azoknak íródtak, akik már jól ismerik a kvantummechanikát. Nagyobb pontossággal mondják el azt, amit magában a szövegben olvasmányosabban igyekszem előadni.

Elméleti fizikai kutatásaim fő célja mindig is a tér és az idő kvantumtermészetének megértése volt. Az, hogy a kvantumelméletet összhangba hozzuk Einsteinnek a térrel és az idővel kapcsolatos felfedezéseivel. Az itt olvasható szöveg azt a pontot tükrözi, ameddig mostanra eljutottam. Nem veszi semmibe a tőle eltérő nézeteket, de céltudatosan részrehajló: az általam hatékonynak ítélt távlatra összpontosít, s arról úgy vélem, hogy a legizgalmasabb utakat nyitja meg. Ez az elmélet 'relációs' értelmezése.

Álljon itt egy figyelmeztetés: a nemtudásunk révén feltáruló szakadék mindig szédítő, és vonz, mint a mágnes. Ám ha komolyan vesszük a kvantummechanikát, és elgondolkodunk mindarról, ami belőle következik, az szinte pszichedelikus élmény: azt várja el tőlünk, hogy így vagy úgy, de mondjunk le olyasvalmiről, ami világértelmezésünkben szilárdnak és kikezdetetlennek látszott. *Arra ösztönöz bennünket, hogy fogadjuk el: a valóság gyökeresen más, mint ahogyan elgondoltuk. Arra készítet, hogy hagyjuk tekintetünket a feneketlen mélységekbe merülni, s ne féljünk attól, hogy belesüppedünk a kifürkészhetetlenbe.* – Szédítő élmény, az ismerkedés közben feltolakodó mérték és hogyanok megragadó világa. Valami olyasmi, mint amire Nietzsche gondolhatott: „Ha hosszan pillantasz a mélységbe, a mélység is beléd tekint.”

*Mi vár ránk ebben a könyvben?* Remekül érzékelteti a tartalomjegyzéke. A három rész fejezetcímei:

- *„Egy különös szépségű belső felé nézve...”* – hogyan történt, hogy egy fiatal német fizikus egy igazán különös gondolatra bukkant, ám az nagyon jól leírta a világot; és hogyan támadt mindebből nagy zűrzavar?
- *Szélsőséges gondolatok mulatságos bestiáriuma* – amelyben különös kvantumesemények olvashatók, és hogy különféle tudósok és filozófusok igyekeznek megérteni őket – ki-ki a maga módján.
- *Lehetséges, hogy valami valóságos neked, de nekem nem?* – ahol végre szó lesz a relációkról.
- *A valóság szövete: kapcsolódások hálója* – ahol arról esik szó, hogy miképpen szólnak egymáshoz a dolgok.
- *„A jelenség egyértelmű leírása magában foglalja azokat a tárgyakat, amelyeknek a jelenség megnyilvánul”* – ahol felvetődik a kérdés, mi következik mindebből a valóságról alkotott elgondolásainkra nézve, és azt tapasztaljuk, hogy a kvantumelmélet újszerűsége nem is olyan új.

- „*A természetnek ez megoldott probléma*” – ahol meg merem kérdezni magamtól, hogy hol lakoznak a gondolatok. És vajon az új fizika megváltoztathatja-e valamennyire ennek a nyugtalanító kérdésnek a feltételeit?
- *Ahol megpróbálok befejezni egy történetet, amelynek nincs vége* – de tényleg lehetséges ez?

További kedvcsinálónak az izgalmas alfejezetcímekből:

- Az ifjú Werner Heisenberg abszurd ötlete: „a megfigyelhető dolgok”
- Erwin Schrödinger félrevezető  $\psi$ -je: „a valószínűség”
- A világ szemcséssége: „a kvantumok” (emlékezzünk: Rovelli ennek okán a Nagy Bummhoz rendelt szingularitást is megfúrta)
- A  $\psi$ , ha komolyan vesszük: sok világ, rejtett változók és fizikai kollapszusok
- A határozatlanság elfogadása (amibe a legtöbbünk legfeljebb csak beletörődni képes, s mentségünkre szól Einstein nagyhírű ellenkezése)
- Volt idő, amikor a világ egyszerűnek tűnt
- A kvantumok ritkás és könnyed világa (Könnyed? Kinek? Ez a rész így indul: „Összegzésül csak annyit, hogy az objektumok tulajdonságai csak a kölcsönhatások pillanatában léteznek, és valóságosak lehetnek az egyik objektum tekintetében, a másikéban meg nem.”)
- Hármas tánc szövi a világ összefüggéseinek hálóját
- Alekszandr Alekszandrovics Bogdanov és Vlagyimir Iljics Lenin
- Naturalizmus szubsztancia nélkül: kontextualitás
- Alapzat nélkül? Nágárdzsuna
- Mit jelent a „jelentés”?
- A világ belülről

Folytassuk az ismerkedést a történettel!

*A nagy ugrás:* „Koppenhágában Bohr, mint egy reneszánsz festő a műhelyében, maga köré gyűjtötte az általa ismert legragyogóbb fiatal fizikusokat, hogy együtt dolgozzon velük az atom titkainak kikutatásán. Közöttük volt Wolfgang Pauli is, egy kiváló, rendkívül intelligens, de nagyképű és pimasz fiatalember, Heisenberg barátja. Pauli a nagy Bohr figyelmébe ajánlotta barátját, Heisenberget, mondván, hogy ide ő kell, ha előbbre akarnak jutni. Bohr 1924 őszén meghívta Heisenberget. Heisenberg néhány hónapot képletekkel teleírt táblák előtt vitatkozott végig Bohrral Koppenhágában.

*Belemerült a problémába. Valósággal a megszállottjává vált.* Mindennel próbálkozott, akárcsak a többiek. Nem működött semmi. Úgy tűnt, nincs olyan, józan ésszel felfogható erő, amely ezekre a Bohr által leírt, különös pályákra, majd ugrásokra készíthette volna az elektronokat. Pedig ezek a röppályák és ugrások jó előrejelzéssel szolgáltak az atomokkal összefüggő jelenségekre. Észveszejtő!

*Helgoland:* Különféle, eltérő gondolatok kavargtak, mint egy robbanóanyag kémiai összetevői, az ifjú Heisenberg fejében, amikor 1925 nyarán Helgoland szigetére menekült. És ott eszébe ötlött egy gondolat. Egy olyan gondolat, amely csak egy huszonéves fiatal határokat nem ismerő radikalizmusából fakadhat. A fizika, a tudomány, teljes világképünk felforgatására hivatott gondolat. Egy olyan gondolat, amelyet az emberiség – úgy hiszem – máig nem emésztett meg.

*A Heisenberg-féle ugrás merész, és merészségében is egyszerű.* Senkinek nem sikerült olyan erőt találnia, amely oka lehetne az elektronok különös viselkedésének? Akkor ne is keressünk ilyen új erőt. Vegyük inkább azt, amelyet már ismerünk: az elektront a maghoz vonzó elektromos erőt. Nem találunk a Bohr-féle röppályákat és ugrásokat igazoló új mozgástörvényeket? Akkor ragaszkodjunk a már ismert mozgástörvényekhez, és ne is változtassunk rajtuk. *Változtassuk meg viszont azt a módot, ahogyan az elektront elgondoljuk.* Ne vegyük röppályán mozgó testnek; mondjunk le az elektron mozgásának leírásáról. Maradjunk meg annak a leírásánál, amit kívülről megfigyelünk: az elektron által kibocsátott fény erősségénél és rezgésszámánál. *Alapozzunk mindent csupán a megfigyelhető mennyiségekre. Ez Heisenberg gondolata.*

Heisenberg azzal tölti idejét a szigeten, hogy [számításokkal igazolja] Bohr szabályait. Alig alszik. Az atombeli elektronnal nem sikerülnek a számítások, az a probléma túl bonyolult. Megpróbálkozik egy egyszerűbb rendszerrel. (Rovelli őt idézi – Osman P.) 'Roppant izgatott lettem, amikor az első kiszámított értékek szemlátomást nem mondtak ellent az energiatételnek. Hajnali három felé járt már, amikor végére értem számításaimnak. Minden egyes energianívó-érték összhangban állt az energiamegmaradás törvényével. *Kétségtelen volt tehát: kvantummechanikám – a számítások alapján – következetes és összefüggő rendszernek bizonyult.* Mélyen megilletődtem. Úgy éreztem, *különös, csodálatos szép világba nyertem bepillantást az atomi jelenségek felszíne alatt.* Szinte szédültem, ha belegendoltam, hogy most aztán alaposan ki kell fürkésznem azokat a rendkívül gazdag matematikai struktúrákat, amelyeket a természet olyan nagylelkűen feltárt előttem.” Rovelli ehhez Galileit idézi: „Nincs ahhoz fogható izgalom, mint meglátni a matematikai törvényt a látszatok rendezetlensége mögött.”

*Az első megerősítés:* „Heisenberg visszatér Helgoland szigetéről az egyetemére, Göttingenbe. Július 9-én egy megjegyzés kíséretében átnyújtja munkája egy példányát professzorának, Max Bornnak, akinek az asszisztenseként dolgozik (onnan hívta el Bohr – Osman P.): 'Egy örült dolgozatot írtam, és nincs merszem közlésre elküldeni valamely folyóiratnak.' Kéri Born, hogy olvassa el a munkáját, és adjon tanácsot. Július 25-én *maga Max Born* küldi el Heisenberg cikkét a *Zeitschrift für Physik*nek.” – Ezzel „a kocka (és a kvantumelmélet magja) el van vetve”.

*Kibontakoztatás:* „Born ráérezett az ifjú asszisztense által megtett lépés jelentőségére. Igyekszik tisztázni a dolgokat. [Pascual Jordannal, tanítványával és Heisenberggel] Lázás munkával néhány hónap alatt sikerül kidolgozniuk egy új mechanika teljes formai szerke-

zetét. Heisenberg elgondolása szerint az elektron mozgását leíró valamennyi mennyiséget nem számként kell felírni, hanem számtáblázatként. *Az elektronnak nem egyetlen  $x$  pozíciója van, hanem egy teljes  $X$  táblázat az elektron lehetséges helyzeteiről: egy-egy ilyen helyzet minden lehetséges ugráshoz. Az alapgondolat szerint használjuk továbbra is a fizika szokásos egyenleteit, csak éppen a szokásos mennyiségek (a helyzet, sebesség, energia és frekvencia) helyébe egyszerűen írjuk be ezeket a táblázatokat. Ez az abszurd javaslat – helyettesítsük a változókat táblázatokkal – pontos értékeket ad a számításokban: azt adja, amit a kísérleti tapasztalat.*”

Újabb kibontakozó ifjú óriás csatlakozik: „A három göttingeni nagy elképedésére Born még az év vége előtt postán egy rövid tanulmányt kap egy ismeretlen angol fiatalembertől. Szerzője lényegében ugyanazt az elméletet fejti ki, de a göttingeni mátrixoknál absztraktabb matematikai nyelven. A tanulmánynak *Paul Dirac* a szerzője.” Rovelli elmondja, miként jutott Dirac odáig, hogy „*a göttingeniektől függetlenül ő is megalkotta ugyanazt a teljes elméletet.*”

*Pauli is beszél:* „Már csak alkalmazni kellett az új elméletet az atombeli elektronra, és ellenőrizni, hogy vajon megállja-e a helyét. Tényleg lehetővé teszi az összes Bohr-pálya kiszámítását? A számítás nehéznek bizonyul, és nem is sikerül hármuknak befejezniük. Paulitól kérnek segítséget, a mindannyiuk közül a legbriliánsabb (egyszersmind legarrogánsabb) elmétől. Pauli válasza: 'Valóban, ez a számítás túl nehéz... nektek.' *Néhány hét alatt, akrobatikus technikával teljessé teszi a számítást. Az eredmény tökéletes: a Heisenberg, Born és Jordan mátrixelméletéből kiszámított energiaértékek pontosan egyeznek a Bohr-féle feltevésekkel. Az új sémából következnek az atomokra felírt különös Bohr-féle szabályok. És ez nem minden. Az elmélet lehetőséget ad a kibocsátott fény intenzitásának kiszámítására is, a Bohr-féle szabályok azt nem adták meg. És ezek az értékek is pontosan megegyeztek a kísérletileg kapott értékekkel! Győzelem!*”

„[Einstein] ezt írja: *Az utóbbi idők legérdekesebb elméleti teljesítménye a Heisenberg–Born–Jordan-elmélet a kvantumállapotokról: igazi boszorkányos számítás.*”

*Bohr évekkel később:* „Akkoriban csak halvány remény látszott rá, hogy [képesek leszünk elérni] az elmélet újrafogalmazását, és fokról fokra kiiktatjuk vele klasszikus gondolatok összes nem megfelelő alkalmazását. Ámulatba ejtettek bennünket egy ilyen elgondolás nehézségei, s mindannyian *a legnagyobb csodálatot éreztük Heisenberg iránt, amikor mindössze huszonhárom évesen egy csapásra célba ért.*”

„*A fiúk sikere:* „Bornt leszámítva – ő ekkor már negyvenéves – Heisenberg, Jordan, Dirac és Pauli is mind a húszas éveikben járnak. Fizikájukat 'Knabenphysiknek', a 'fiúk fizikájának' nevezik Göttingenben.”

*A „macskás óriás” is beszél:* „1926-ban úgy fest, hogy minden tisztázódik. *Erwin Schrödinger* osztrák fizikusnak sikerül ugyanazt az eredményt elérnie, mint Paulinak, vagyis kiszámítania az atom Bohr-energiáit, de ő ezt egészen más úton teszi. (Rovelli apró, pompás kultúrtörténeti leírásokkal is színesíti elbeszélését – a profi jól tudja, nem szabad hagyni,

hogy az olvasó belefáradjon a szakmai részletekbe. Ezt teszi Schrödingerrel is, sőt megkockáztatható: pár részlettel egészen a bulvárig elmegy – Osman P.) Schrödinger ügyesen *fordítva járja végig* a hullámeqyenlettől a fénysugár pályájához vezető utat, és ezen az akrobatikus módon kideríti, hogy az atombeli elektronhullámnak milyen egyenletet kell kielégítenie. Vizsgálja ennek az egyenletnek a megoldásait, és... levezeti belőlük a Bohr-energiákat. Ez már igen! *Tudomást szerezve Heisenberg, Born és Jordan elméletéről, sikerül bebizonyítania, hogy matematikai szempontból a két elmélet lényegében megegyezik:* ugyanazokat az értékeket jelzik előre.”

*Színes, élénk történetmesélés:* „Schrödinger is a századelő eleven bécsi filozófiai és szellemi világának neveltje, megigézi a keleti gondolkodás, különösen a hindu Védánta, szenvedélyesen érdeklő a világot ’képzetnek’ felfogó Schopenhauer filozófiája (akárcsak Einsteint). Nyilvánvalóan nem tartja vissza a megfelelni akarás, nem is aggodalmaskodik amiatt, hogy ’mit gondolnak az emberek,’ így *attól a gondolattól sem riad vissza, hogy az anyag világot a hullámok világával helyettesítse.*” – Az már a tudomány érdeme, hogy a történet fejleményei fordulatosabbak egy jó kriminél is.

*Győzelem?* „Ez a ’hullámmechanika’ nyomban meggyőzőbbnek tűnik a göttingeni ’mátrixmechanikánál,’ még ha az ugyanazokat az előrejelzéseket adja is. Schrödinger számítása sokkal egyszerűbb a Pauli-félenél. A 20. század első felének fizikusai jól ismerték a hullámegyenleteket, de nem ismerték a mátrixokat. ’Schrödinger elmélete igazi megkönnyebbülés volt: nem kellett megtanulnunk a mátrixok különös matematikáját’ – mondta a korszak egyik ismert fizikusa. S ami a legfőbb: *a Schrödinger-hullámokat könnyű elképzelni és szemléletessé tenni.* Világosan megmutatják, mi lesz az ’elektronpályából,’ amelyet Heisenberg el akart tüntetni: *az elektron egy terjedő hullám, és pontum. Ezért nincsenek trajektóriák. Schrödinger minden tekintetben diadalmaskodni látszott.*”

*Ámde:* „Heisenberg nyomban átlátja, hogy Schrödinger hullámainak fogalmi tisztasága csupán délibáb. Egy hullám előbb vagy utóbb szétterjed a térben, az elektron meg nem: ha valahova megérkezik, akkor mindig és csakis egyetlen pontba érkezik. Ha egy elektron kilökődik egy atommagból, akkor a Schrödinger-egyenlet azt jelzi előre, hogy a  $\psi$ -hullám egyenletesen terjed szét a térben. De ha az elektront észleljük, például egy Geiger-számlálóval vagy egy televízió képernyőjén, akkor az csak egyetlen pontban van jelen, nem a térben szétterjedve.

A Schrödinger hullámmechanikájáról folytatott vita gyorsan fellángol, és nyomban elmérgeződik. Heisenberg, mivel megkérdőjelezve érzi felfedezésének súlyát, élesen fogalmaz: ’Minél jobban elgondolkodom Schrödinger elméletének fizikai aspektusain, annál taszítóbbnak találom őket. Az, amit Schrödinger ír elméletének képi megjeleníthetőségéről, az vélhetően nem teljesen helyes, másképpen mondva: sületlenség.’ Schrödinger iróniával igyekszik válaszolni: ’Nem tudom elképzelni, hogy egy elektron bolha módjára ide-oda ug-ráljon.’ Évekkel később Schrödinger, aki a kvantumok által felvetett kérdések egyik legélesebb szemű elemzőjévé vált, felismeri vereségét.



„S újra Max Born tesz hozzá egy lényeges összetevőt a kérdéshez, elsőként értve meg Schrödinger  $\psi$ -jének jelentését. Ő érti meg, hogy a Schrödinger-féle  $\psi$ -hullám értéke a térnek egy pontjában összefügg a valószínűséggel: azzal, hogy az elektron mekkora valószínűséggel figyelhető meg abban a pontban. Ugyanez igaz – mint majd hamarosan kiderül – a göttingeni mátrixmechanikára is: a matematika valószínűségi előrejelzéseket ad, nem egzaktakat. A kvantumelmélet a Heisenberg-féle változatban éppúgy, mint a Schrödinger-félében valószínűségeket jelez előre, s nem bizonyosságokat.”

„Einstein sok tekintetben ihletője a kvantummechanikának. Elképzelése, amely szerint a fény hullám, egyszersmind fotonfelhő is, zavaros ugyan, de ez indítja De Broglie-t arra a gondolatra, hogy minden elemi részecske hullám, majd Schrödingert, hogy bevezesse a  $\psi$ -hullámot. Heisenberget arra inspirálja, hogy csak a mérhető mennyiségekre legyen tekintettel. Sőt abban is első volt, hogy a valószínűség felhasználásával vizsgálta az atomi jelenségeket, s az általa megkezdett úton jutott Born a  $\psi$ -hullám valószínűségi felfogásáig.”

Íme az igazság másik oldala! Einstein illetően a laikus köztudatban inkább legendás el-lenkezőse él a kvantummechanikával szemben. Walter Isaacson idézi tőle Einstein: Egy zse-ni élete és világa c. könyvében (Alexandra Kiadó – Iparjogvédelmi és Szerzői Jogi Szemle 2009/4. sz.): „Lehetséges-e kombinálni az energiakvantumokat a sugárzás hullámszerűségével? Látszólag nem, de a Mindenhatónak – úgy tűnik – valamilyen trükkkel mégiscsak sikerült”.

Az eddigiek összegzéseként és ugrópontként a továbbiakhoz, Rovelli így ír: „Ennek a rész-nek a befejezése előtt mondanék néhány szót arról az egyetlen egyenletről, amelyet a kvan-tumelmélet hozzátesz a klasszikus fizikához. Mókás egy egyenlet! ... Csodálatosan tömör, és pofonegyszerű. Felfoghatatlanul. Ne is próbálkozzunk a megfejtésével: a tudósok és a filozófusok is ölre mennek a jelentésén. Később még visszatérek ide, hogy egy kicsit jobban megvilágítsam a tartalmát. De leírni leírom, hiszen ez a kvantumelmélet lényege. Tessék:

$$XP - PX = i \hbar$$

Ennyi az egész. Az X egy részecske helyét jelöli, P a sebességét a tömegével megszorozva (a fizikusok ezt 'lendületnek' vagy 'impulzusnak' nevezik). Az  $i$  a  $-1$  négyzetgyökének ma-tematikai jele, a  $\hbar$  pedig a Planck-állandó  $2\pi$ -vel osztva. Bizonyos értelemben Heisenberg és társai csak ezt az egyszerű egyenletet tették hozzá a fizikához: minden más ebből következik, a kvantumszámítógépektől kezdve az atombombáig. Ennek a rendkívüli formai egyszerűség-nek a rendkívül homályos jelentés az ára. A kvantumelmélet megjósolja a szemcsésséget, a kvantumugrásokat, a fotonokat és minden egyebet egyetlen, nyolc karakterből álló egyenlet alapján. Egy olyan egyenletből, amely azt mondja, hogy a hely a sebességgel megszorozva más, mint a sebesség a hellyel megszorozva. Teljes átláthatatlanság.”

S a diadalmenet: „1927-ben Bohr előadást tart Olaszországban, s abban összefoglalja mindazt, amit az új kvantumelméletből már megértettek (vagy még nem értettek meg), és

elmagyarazza, hogyan kell az elméletet alkalmazni. 1930-ban Dirac könyvet ír, s remekül megvilágítja benne az új elmélet formális szerkezetét. Mindmáig ebből a kötetből lehet a legjobban tanulni. 1932-ben *a kor legnagyobb matematikusa, Neumann János* egy ragyogó matematikai fizikai munkában tisztázza a formális kérdéseket. Az elmélet megalkotása után szinte záporoznak a Nobel-díjak: még egy ilyen elismerés-sorozatra nincs példa a történelemben. 1921-ben *Einstein* kapja meg, főképpen azért, hogy a fénykvantumok bevezetésével tisztázta a fényelektromos jelenséget. *Bohr* 1922-ben kapja meg az atom szerkezetére vonatkozó szabályokért, *De Broglie* 1929-ben az anyaghullámok gondolatáért, *Heisenberg* 1932-ben 'a kvantummechanika megalkotásáért', *Schrödinger* és *Dirac* 1933-ban az atomelmélet területén tett 'új felfedezésekért'. *Pauli* 1945-ben az elmülethez való technikai hozzájárulásért. *Born* 1954-ben azért, hogy megértette a valószínűség szerepét (bár ennél sokkal többet tett)."

„Relációk”: mondandónk relációja a terjedelmi korláthoz azt mutatja, hogy a továbbiakban már csak párat ugorhatunk a gazdag és roppant izgalmas tartalomban, mint egy felizgatott elektron a felhőjében.

A kvantumelmélet fogalmi alapja a Szuperpozíciók alfejezetből: „A kvantumok furcsaságai abból a jelenségből adódnak, amelyet 'kvantumozó szuperpozíciónak' vagy egyszerűen 'szuperpozíciónak' nevezünk. A szuperpozícióban bizonyos értelemben két, egymásnak ellentmondó tulajdonság együttesen van jelen. (Igen, ahogy a fejezet is mondja, Schrödinger híres macskája is ilyenben leledzik – Osman P.) Egy tárgy például lehet itt is, meg ezzel egy időben ott is. Bizonyos értelemben mindkét helyen ott van. Ahogyan a fizikusok mondják egymás között: egy objektum több helyzet szuperpozíciójában lehet. Dirac ezt a furcsaságot a 'szuperpozíció elvének' nevezi, s az ő szemében ez volt a kvantumelmélet fogalmi alapja. De legyünk nagyon óvatosak: magát a szuperpozíciót sohasem látjuk, csupán a következményeit. Ezeket a következményeket 'kvantuminterferenciának' nevezzük. Látni az interferenciát látjuk, nem a szuperpozíciót.” S egy optikai szemléltetés ábrájához: „Kvantuminterferencia. Ha a kezünkkel megszakítjuk az egyik fényutat, akkor a fotonok fele a felső detektorba jut, felük az alsóba. De ha egyiket sem szakítjuk meg, akkor a fotonok mind a lentibe kerülnek. Hogyan készíti az egyik nyaláb útjába tett kéz a másik úton haladó fotonokat arra, hogy a lenti detektorba menjenek? Ezt senki sem tudja. ... Ha ettől összezavarodsz, nem látod se fülét, se farkát, hát nem vagy egyedül. Ezért mondta azt Feynman, hogy senki sem érti a kvantumokat.”

*Heisenbergék Csodaországá:* „A kvantummechanika értelmezéseinek mindegyike igen radikális gondolatok elfogadását várja el tőlünk: többszörös univerzum, láthatatlan változók, soha senki által meg nem figyelt jelenségek és más különös szerzetek. És ez senkinek sem róható fel: az elmélet furcsasága szélsőséges megoldások felé kényszerít bennünket.” Még ebből egy kicsikét:

*Csak erős idegzetűeknek: „A 'sokvilág elgondolás' az, hogy komolyan kell vennünk Schrödinger elméletét. A  $\psi$ -hullámot ne valószínűségnek, hanem valóságos, a világot a maga valójában leíró létezőnek értelmezzük. E szerint engem is leír a magam  $\psi$ -hulláma. Amikor a macskát figyelem (Schrödinger példája – Osman P.), az én teljességgel valóságos  $\psi$ -hullámom kölcsönhatásba kerül a macska hullámával, és az én  $\psi$ -hullámom is két részre oszlik, s az egyik az éber-macskát látó változatomat írja le, a másik azt a változatot, amelyik az alvó-macskát látja. Ebből a nézőpontból mindkettő valóságos. Következésképpen a teljes  $\psi$ -nek most két összetevője van: két 'világa'. [Így] két változatot van: egy-egy mindegyik világban. S mert Carlo (én)  $\psi$ -je a macskán kívül folyamatos kölcsönhatásban van ki tudja, hány más rendszerrel, ebből az következik, hogy végtelen sok párhuzamos világ van, s azok szintúgy léteznek, éppolyan valóságosak, és végtelenül sok másolat létezik bennük belőlem, és megtapasztalják az alternatív valóságok mindenféle formáját. Ez a sokvilágelmélet. Örjítőnek tűnik? Csak azért, mert az is. Márpedig kiváló fizikusok és filozófusok úgy vélik, hogy ez a kvantumelmélet lehető legjobb olvasata. Nem ők tébolyodtak meg: ez a már egy évszázada oly bámulatosan jól működő elmélet az örjítő!”*

Innen nézve milyen sajátosnak érződik Karinthy Frigyes groteszkje: „Azt álmodtam, hogy két macska voltam és játszottam egymással.” S milyen érdekes Bálint György elemzése 1938-ból, aki vajon mennyit tudott a kvantummechanikáról?: „Zseniális kis mondat, benne van az egész Karinthy-filozófia. Tündérien játékos és mégis döbrentően súlyos támadás a polgári racionalizmus merev rendszere ellen, melynek alap-dogmája, hogy egy dolog mindig csak önmagával lehet azonos. De tagadása, illetve fölényes semmibevétele a polgári irracionalizmusnak, a miszticizmusnak is, mely szerint minden dolog végső fokon azonos valami bizonytalan és érthetetlen 'magasabbrendű' ős-dologgal, melyben minden egyesül. Karinthy bölcselete egyaránt túllép a racionalizmuson és az irracionálismon és feloldja ellentéteiket. Szigorúan a valóság alapján áll, olyan hevülettel hirdeti, mint egy próféta. És mint a valóság prófétája, elismeri ugyan, hogy minden dolog önmagával azonos csupán de megállapítja, hogy kissé bonyolultabban azonos, mint ahogy a logikai sémák megengedik. Mert minden ami van: kétértékű, negatív és pozitív. Minden ami van, ellentétekből áll. A valóság voltaképpen két macska, mely szakadatlanul játszik egymással. Ezt természetesen nem látjuk mindig; csak akkor látjuk, ha becsukódik a szemünk a kapu előtt és álmodni kezdünk. Vagy ha Karinthyt olvassuk. Vagy más bátor filozófusokat.” (Bálint György: A két macska költője, Nyugat, 1938. 10. szám.)

A továbbiakban ehhez következik: „Rejtett változók: Van mód elkerülni a világok és önmagunk másolatainak végtelen megsokszorozódását...” majd „Fizikai kollapszusok: Van egy harmadik módja is annak, hogy valóságosnak tekintsük a  $\psi$ -hullámot, amivel elkerülhetjük mind a sokvilágértelmezést, mind a rejtett változókra alapuló értelmezést...”

*A Relációk alfejezet elé:* „Mindent összevetve a kvantumelmélet [eddig] felvázolt értelmezései csak megismétlik a Schrödinger és Heisenberg közötti vitát: a vitát egyfelől az indeterminizmust és a világban uralkodó valószínűséget bármi áron elhárítani igyekvő 'hullámmechanika', másfelől a 'fiúk fizikájának' radikális ugrása között, amely mintha túlságosan is függene egy 'megfigyelő' szubjektum létezésétől. Ki ez az információt ismerő és megtartó szubjektum? Milyen információja van? Mit figyel meg? Kívül áll-e a természeti törvényeken, vagy ő maga is alá van vetve nekik, és leírható velük? Ha meg a természet része, akkor miért bánunk vele másképpen? Ez a kérdés a ki tudja, hányadik újrafogalmazása a Heisenberg által felvetett kérdésnek – *mi a megfigyelés, mi a megfigyelő* –, és elvezet végre bennünket *e könyv fő gondolatához: a relációkhoz.*

„*Relációk:* Az egész könyv sarokköve az az egyszerű megállapítás, hogy *a kutató maga is a természet része, akárcsak a mérőeszköze. Amit a kvantumelmélet leír, az az, ahogyan a természet egy része megmutatkozik a természet egy másik része előtt.* A kvantumelmélet itt bemutatandó 'relációs' értelmezésének *az a gondolat a lényege*, hogy az elmélet nem azt a módot írja le, ahogyan a kvantumobjektumok nekünk (vagy speciális, 'megfigyelő' létezőknek) megnyilvánulnak, hanem azt, *hogyan nyilvánul meg bármely fizikai objektum bármely más fizikai objektumnak.* Azt, hogy *hogyan hat bármely fizikai objektum bármely más fizikai objektumra.*” *Kölcsönhatások éltetik:* „*Az általunk megfigyelt világ folyamatos egymásra hatás.* Kölsönhatások, interakciók sűrű hálózata. Az egyedi objektum nem egyéb, mint maga a mód, ahogyan kölcsönhatásba lép más egyedi objektumokkal.” – Majdhogynem megkísért a gondolat: ha egyedül ülök a sötétben, minden kapcsolódás nélkül, talán nem is vagyok? Persze kivéve, ha gondolkodom!

„A kvantumelmélet, úgy hiszem, annak a felfedezése, hogy valamely dolog tulajdonságai mind-mind csak az a mód, ahogyan az a dolog befolyásolja a többi. A dolgok csak más dolgokkal való kölcsönhatásaikban léteznek. A kvantumelmélet annak az elmélete, ahogyan a dolgok befolyásolják egymást. És a természetről ez a legjobb leírásunk.” – Valóban nehéz ezt befogadni – miként értelmezzük pl. a geográfiára?

*Házi feladat?* Első látásra bizarr, átgondolva viszont nagyon is logikus belső cím következik: „*Nincs interakció – nincs tulajdonjog.*” Rovelli itt így beszél: „Egy objektumot az a mód jellemez, ahogyan más objektumokra hat. A valóság a kölcsönhatásoknak ez a hálója, amelyen kívül még az sem érthető, miről beszélünk egyáltalán. A kvantumelmélet arra ösztönöz bennünket, hogy *a fizikai világra ne úgy tekintsünk, mint meghatározott tulajdonságú objektumok összességére, hanem mint relációk, kapcsolatok hálózatára. A tárgyak a csomópontok benne.*” Tulajdonról itt egy szó sem esik, utánagondolva mégis világos a cím igazsága: a tulajdonjog is viszonyt, dolgok és személyek viszonyát rendez.

A tulajdonságok nélküli állapot: (az előzőleg idézett gondolatmenet folytatása) „Ennek az a mélyreható következménye, hogy fölösleges és félrevezető lehet sajátságokat tulajdonítani egy dolognak, ha az nincs interakcióban. Az olyasmi, mint beszélni valamiről, ami nincs, az interakciókon kívül ugyanis nincsenek tulajdonságok. Ez Heisenberg eredeti ráérzésének

jelentése: Ha az elektron nem lép interakcióba, akkor nincsenek tulajdonságai. Ez radikális ugrás. Ugyanaz, mint azt mondani, hogy minden dolog csupán annyi, ahogyan valami másra hat.”

*Finito!* mondaná Rovelli, ennyi férhetett ide. Erősen ajánlható alapos interakcióba lépni a könyv minden részével – megmutatkoznak remek tulajdonságai. Gyakran valóban hajmeresztő – ez azonban az anyagi világ műve, nem Rovellié!

Végezetül egy roppant eretnek magánmegjegyzés: Minden bevett hit mellett is, hol egy magyarázat arra, vajon honnan az anyagnak az a tulajdonsága, amely lehetővé teszi, hogy a kvantummechanika szabályainak engedelmesskedjék??

*Dr. Osman Péter*