

A fénykép, amely megváltoztatta a világot

EINSTEIN, BOHR ÉS A KVANTUMFORRADALOM

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi$$



HÁTTÉRGYÁR

A borító AI felhasználásával készült

A FÉNYKÉP, AMELY MEGVÁLTOZTATTA A VILÁGOT

Einstein, Bohr és a kvantumforradalom

© Háttérgyár, 2026

Minden jog fenntartva.

Kiadó: Háttérgyár

Kiadás éve: 2026

hattergyar.hu

Ez a mű szerzői jogi védelem alatt áll. Részleteinek bármilyen formában való sokszorosítása, terjesztése vagy nyilvánosan elérhetővé tétele a kiadó előzetes írásbeli engedélye nélkül tilos.

A borító mesterséges intelligencia felhasználásával készült.

Tartalom

Előszó	4
1. fejezet - A kép, amelyből legenda lett	8
2. fejezet - Ernest Solvay és a tudósok parlamentje	13
3. fejezet - Planck és a kétségbeesett kvantum	18
4. fejezet - Einstein és a fény részecskéi	22
5. fejezet - Rutherford atomja és Bohr ugrása	27
6. fejezet - De Broglie és az anyag hullámai	32
7. fejezet - Helgoland: amikor eltűntek az elektronpályák	37
8. fejezet - Schrödinger hullámai	41
9. fejezet - Max Born és a valószínűség belépése	46
10. fejezet - Heisenberg határozatlansága	50
11. fejezet - Bohr komplementaritása	54
12. fejezet - Brüsszel, 1927. október 24.	58
13. fejezet - Einstein kérdései, Bohr válaszai	63
14. fejezet - A konferencia öt nagy beszámolója	68
15. fejezet - A „koppenhágai győzelem” mítosza	72
16. fejezet - Huszonkilenc ember, tizenhét Nobel-díj	76
17. fejezet - Dirac és az antianyag	80
18. fejezet - 1933: amikor a politika belépett a laboratóriumba	84

19. fejezet - Az atommag és a fegyver árnyéka	88
20. fejezet - A tranzisztor: amikor a kvantummechanika beköltözött a hétköznapiakba	92
21. fejezet - Lézer, atomóra és a kvantumtechnológia első hulláma	96
22. fejezet - EPR, Bell és a kísérteties távolhatás	100
23. fejezet - A kvantumszámítógép felé	104
24. fejezet - Mit látunk ma a fényképen?	108
Utószó	113
Kronológia	116
A fénykép szereplői	122
Források és ajánlott irodalom	127
Szerkesztői megjegyzés	131

Előszó

Van egy fénykép, amelyet a tudománytörténet iránt érdeklődők akkor is felismernek, ha első pillantásra nem tudják felsorolni rajta mindenki nevét. Három sorban huszonkilenc ember ül és áll egy brüsszeli épület előtt. A kompozíció elsőre merev, a kor csoportképeire jellemző: sötét öltönyök, komoly arcok, kevés gesztus. A néző figyelme mégis hamar elakad néhány ismerős arcon. Albert Einstein középen ül. Mellette Hendrik Lorentz és Paul Langevin, néhány székkal arrébb Marie Curie és Max Planck. A második sorban Niels Bohr, Max Born, Louis de Broglie, Arthur Compton és a huszonöt éves Paul Dirac. A legfelső sorban Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli és Werner Heisenberg. A képen szereplők közül tizenheten már Nobel-díjasok voltak, vagy később azok lettek.

A felvétel az ötödik Solvay-fizikakonferencia résztvevőiről készült 1927 októberében. A tanácskozás hivatalos címe „Elektronok és fotonok” volt. Hat napon át tartott, október 24-től 29-ig, és azt próbálta tisztázni, milyen világképet kényszerít a fizikára az előző néhány évben megszületett új kvantummechanika. A konferencián mindössze öt fő beszámoló hangzott el; a

program nagy részét vita töltötte ki. A résztvevők közül sokan azért érkeztek Brüsszelbe, hogy megértsék, mit jelent az a matematika, amely meglepő pontossággal írta le az atomokat, ám egyre kevésbé hasonlított a hétköznapi tapasztalatok világára.

A fénykép később legendává vált. Gyakran nevezik „a valaha készült legintelligensebb fényképnek”, mintha egyetlen pillanatban sűrűsödött volna össze a modern fizika egész története. A jelző látványos, de félrevezető is lehet. A képen nem egyetlen közös gondolat hívei láthatók. Ellenkezőleg: különböző nemzedékek, eltérő filozófiai hajlamok és egymással versengő elméletek képviselői kerültek egy képre. Einstein ugyanott ül, ahol Bohr, de a kvantummechanika értelmezéséről alapvetően mást gondolnak. Schrödinger matematikailag hozzájárult az új elmélet megszilárdításához, mégsem tudta elfogadni azt a később uralkodóvá váló felfogást, amely szerint a hullámfüggvény nem egy valóságosan szétterülő anyaghullámot, hanem valószínűségeket ír le. De Broglie saját elképzeléssel érkezett a részecskék és hullámok viszonyáról. Born és Heisenberg viszont már arról beszélt, hogy az új kvantummechanika lényegi kerete elkészült.

Ez a könyv ezért nem egy konferencia jegyzőkönyvének feldolgozása, és nem is hagyományos fizikakönyv. A cél az, hogy a brüsszeli csoportképet kapuként használjuk egy korszakhoz. Megnézzük, milyen problémák kényszerítették Max Planckot 1900-ban arra, hogy az energia folytonosságát feladva kvantumokkal számoljon. Követjük Einsteint, amikor 1905-ben a fényt is kvantumok természetűnek tekinti, majd Bohrt, amikor az atom stabilitását próbálja összeegyeztetni a klasszikus elektrodinamika kudarcával. Eljutunk de Broglie anyaghullámjaihoz, Heisenberg mátrixmechanikájához, Schrödinger hullámmegyenletéhez, Born statisztikai értelmezéséhez, a határozatlansági relációhoz és Bohr komplementaritásához. Ezek után Brüsszel már nem elszigetelt esemény lesz, hanem egy évtizedeken át érlelődő válság sűrűsödési pontja.

A történet 1927-ben sem ér véget. A fénykép szereplőinek életét néhány év múlva szétszakította a politika. Hitler hatalomra jutása után tudósok hagyták el Németországot, laboratóriumok és egyetemek ürültek ki, korábbi barátok és kollégák különböző országokban, olykor egymással háborúban találták magukat. A kvantummechanika közben az elméleti fizika egyik legbiztosabb eszközévé vált. Nélküle nem lett volna

modern félvezetőfizika, tranzisztor, lézer, atomóra, mágneses rezonancia, a mai elektronika jelentős része. Ugyanabból a fizikából vezetett út az atommag energiájának felszabadításához, amelyből a Manhattan-terv fegyvere is megszületett. A huszadik század végére pedig az Einstein által felvetett filozófiai kifogások egy része új kísérleti programokat indított el, amelyek az összefonódás és a Bell-egyenlőtlenségek vizsgálatán keresztül a kvantuminformatika felé vezettek.

A címben szereplő „megváltoztatta a világot” ezért nem azt jelenti, hogy maga a fénykép okozott bármit. A kép tanúság. Azt a ritka pillanatot őrzi, amikor egyetlen teremben találkozott a régi fizika tekintélyeinek és az új fizika forradalmárainak szinte teljes élvonala. A résztvevők nem tudhatták, milyen technológiák, politikai katasztrófák és filozófiai viták nőnek ki abból, amiről beszéltek. Mi viszont már tudjuk, hová vezetett az út. Ez ad különös feszültséget a csoportkép minden arcának.

1. fejezet - A kép, amelyből legenda lett

A csoportképek rendszerint utólag kapnak jelentést. A fényképezés pillanatában a résztvevők többnyire nem érzik, hogy történelmet írnak; egy konferencia szünetében, ünnepség vagy hivatalos esemény után beállnak a kamera elé, majd visszatérnek a dolgukhoz. Az 1927-es Solvay-felvétel utóélete mégis különleges. Benjamin Couprie fényképén huszonkilenc tudós látható, és a kép azóta a tudományos zseni szinte ikonikus ábrázolásává vált. A népszerű kultúrában gyakran úgy jelenik meg, mintha valamiféle rendkívüli szellemi válogatott tablója volna. A valós történet ennél érdekesebb, mert a fényképen nemcsak nagy elmék, hanem egy korszak konfliktusai is jelen vannak.

Az első sorban ülők a fizika korábbi forradalmát képviselik. Max Planck ötvenkilenc éves, Nobel-díját már megkapta. Marie Curie az egyetlen nő a képen, kétszeres Nobel-díjasként olyan tekintély, akinek tudományos pályáját már az első világháború előtt legendák övezték. Albert Einstein negyvennyolc éves, a relativitáselmélet alkotójaként a világ legismertebb tudósai közé tartozik. Hendrik Lorentz, a konferencia elnöke, még a

tizenkilencedik században kezdte pályáját. Olyan fizika képviselői ők, amelynek nyelvét még a folytonosság, a térben és időben zajló jól meghatározott folyamatok uralták, még akkor is, ha éppen ők segítették felszámolni a klasszikus világkép biztonságát.

A hátsó sorban feltűnően fiatal arcok vannak. Heisenberg huszonöt éves, Pauli huszonhét, Dirac huszonöt. Néhány év alatt olyan matematikai formalizmust hoztak létre, amelyhez képest a Bohr-féle régi kvantumelmélet már átmeneti állomásnak tűnt. A generációs különbség mögött eltérő tudományos tapasztalat és szemlélet is állt. Einstein és Bohr ugyanúgy a kvantumelmélet születésének főszereplői voltak, mégis egészen eltérően viszonyultak ahhoz, amivé az új fizika 1927-re vált. Einstein nem a kvantumjelenségeket tagadta; ellenkezőleg, ő maga bizonyította a fény kvantumok természetének jelentőségét. Az zavarta, hogy a kvantummechanika a természet alapvető leírásában a valószínűséget és a mérési eredményeket emelte központi helyre.

A kép egyik különös ereje abból fakad, hogy a későbbi sorsokat is belelátjuk. Amikor a fénykép készült, senki sem tudhatta, hogy hat év múlva Adolf Hitler lesz Németország kancellárja. A tudományos világ, amelyet

ezek az emberek nemzetközi levelezések, utazások, ösztöndíjak és konferenciák hálózataként ismertek, rövid idő alatt politikai határok és faji törvények által szabdaltsá válik. Einstein már 1933-ban nem tér vissza Németországba. Schrödinger elhagyja berlini állását. Born emigrációba kényszerül. Pauli később az Egyesült Államokban dolgozik. Bohrnak 1943-ban menekülnie kell a megszállt Dániából. Mások, köztük Heisenberg, Németországban maradnak, és az utókor évtizedekig vitatja majd, hogyan értékelhető szerepük a Harmadik Birodalom tudományában.

A konferenciáról fennmaradt kép egy elveszett európai tudományos világ csoportképe is. 1927-ben még elképzelhető volt, hogy német, francia, brit, dán, belga, svájci, osztrák és amerikai tudósok együtt vitatkozzanak ugyanarról az elméletről, alig egy évtizeddel az első világháború után. A Solvay-tanácskozások maguk is ennek a nemzetközi tudományos kultúrának a termékei voltak. A konferencia ráadásul az első olyan Solvay-fizikatanács volt a háború után, amelyre német tudósokat ismét meghívtak. A kép ezért tudománytörténeti és európai politikatörténeti dokumentum is.

A legendával azonban óvatosan kell bánni. Sok népszerű elbeszélés úgy mutatja be a brüsszeli találkozót, mintha Einstein és Bohr egyetlen nagy vitában döntötte volna el a kvantummechanika sorsát, és Bohr ott végleg legyőzte volna Einsteint. A konferencia jegyzőkönyvei és a későbbi történeti kutatások ennél jóval összetettebb képet adnak. A tanácskozáson több értelmezési program versenyzett. De Broglie pilotahullám-elmélete, Schrödinger hullámmechanikája, Born és Heisenberg valószínűségi megközelítése, valamint Bohr komplementaritásának kialakuló gondolata nem rendeződött két tiszta táborba. Az sem igaz, hogy mindenki 1927 végére elfogadta volna egy egységes „koppenhágai értelmezés” kész csomagját. Maga ez a kifejezés és a hozzá kapcsolódó történeti leegyszerűsítés később vált igazán elterjedté.

A fényképet ezért félrevezető volna győztesek és vesztesek tablójának nézni. Olyan pillanatfelvétel ez, amelyen a modern fizika még nyitott kérdések sorát hordozza. A matematika működik, de az értelmezés bizonytalan. A kísérletek egyre világosabban mutatják a hullám-részecske kettősséget, de nincs egyetértés arról, mit mondhatunk egy részecske pályájáról akkor, amikor nem mérjük. Einstein számára a fizika feladata továbbra

is egy megfigyelőtől független valóság leírása. Bohr szerint viszont az atomi jelenségekről csak a mérési elrendezés és a megfigyelhető eredmények nyelvén beszélhetünk következetesen.

A huszonkilenc arc közös képe ezért nem a konszenzust, hanem a termékeny bizonytalanságot őrzi. A résztvevők abban többé-kevésbé egyetértettek, hogy a régi fizika nem elég. Abban már kevésbé, hogy mivel kell helyettesíteni. A modern tudomány egyik legnagyobb ereje éppen ebben mutatkozik meg: ugyanazon elmélet létrehozói és használói hosszú időn át vitatkozhatnak annak jelentéséről úgy, hogy közben az elmélet számításai egyre pontosabbak és alkalmazásai egyre sikeresebbek lesznek.

2. fejezet - Ernest Solvay és a tudósok parlamentje

A Solvay-konferenciák története egy iparos vagyonával kezdődött. Ernest Solvay belga vegyész és vállalkozó a tizenkilencedik század második felében olyan eljárást fejlesztett tovább és tett iparilag rendkívül sikeressé, amely a szódagyártást forradalmasította. A Solvay-vállalat gyors növekedése hatalmas vagyont teremtett számára, de Solvay nem elégedett meg azzal, hogy gyárosként maradjon ismert. Érdekelte a tudomány, a társadalom és a gazdaság elmélete, és vagyonának jelentős részét kutatásra, oktatásra és tudományos intézmények támogatására fordította.

A századforduló fizikája olyan alapvető problémákba ütközött, amelyekre a megszokott módszerek nem adtak jó választ. A hősugárzás, az atomok stabilitása, az elektron felfedezése és az anyag mikroszkopikus szerkezete új gondolkodást követelt. Walther Nernst német fizikai kémikus felismerte, hogy Európa vezető fizikusait szűk körű tanácskozásra kellene összehívni. Solvay pénze és szervezési készsége lehetővé tette az ötlet megvalósítását. Az első Solvay-fizikatanács 1911-ben ült össze Brüsszelben, és már akkor különleges

névsort vonultatott fel: Planck, Einstein, Lorentz, Marie Curie, Poincaré, Rutherford és mások vitatták meg a sugárzás és a kvantumelmélet problémáit.

A Solvay-forma eltért a nagy kongresszusoktól. Kevés meghívott vett részt, a programot néhány hosszú előadás és részletes vita uralta. A cél nem az volt, hogy minél több kutató bemutassa legújabb eredményeit, hanem hogy a legfontosabb nyitott kérdéseket egy asztal körül ütköztessék. A konferencia ezért inkább hasonlított tudományos parlamenthez, mint vásárhoz. A meghívás önmagában rangot jelentett, a jelenlévők pedig gyakran olyan problémákról beszéltek, amelyeknél még a használt fogalmak értelme sem volt véglegesen tisztázott.

Az első világháború azonban ezt a nemzetközi hálózatot is megrázta. A tudomány nem maradt kívül a nacionalizmuson. Kutatók írtak alá politikai nyilatkozatokat, intézmények szakították meg kapcsolataikat korábbi kollégáikkal, és a háború után a német tudományos világot több nemzetközi szervezetből kizárták. A Solvay-tanácsok sem kerülhették el ezt a légkört. Az 1927-es ötödik fizikatanács ezért a tudományos normalizálódás egyik jele is volt: a német tudósok ismét részt vehettek a találkozón.

Ernest Solvay 1922-ben meghalt, de az általa alapított intézmény folytatta munkáját. A konferenciákat nem egyetlen ember kíváncsisága, hanem tartós szervezet működtette. Az ötödik tanács elnöke Hendrik Antoon Lorentz lett, aki kivételes tekintéllyel rendelkezett. Lorentz elméleti fizikusként az elektromágnesség és az elektronelmélet egyik legfontosabb alakja volt, munkája közvetlen előzménye Einstein speciális relativitáselméletének. Emellett ritka diplomáciai készséggel tudott eltérő véleményű tudósokat közös vitában tartani. 1927-ben már hetvennégy éves volt, és alig néhány hónappal a konferencia után, 1928 februárjában meghalt.

A konferencia hivatalos témája, az „Elektronok és fotonok” jól mutatta, mennyire megváltozott a fizika az 1910-es évek óta. Az elektronról már nem lehetett egyszerű, negatív töltésű golyóként gondolkodni, és a fény leírásához sem volt elegendő az elektromágneses hullám fogalma. A Compton-effektus azt mutatta, hogy a röntgensugárzás ütközésekben részecskeszerű impulzust ad át. De Broglie ezzel szemben azt javasolta, hogy az anyagi részecskékhez is hullámok tartozhatnak. Schrödinger hullámegyenlete az elektronok viselkedését hullámfüggvénnyel írta le. Heisenberg olyan mechanikát

alkotott, amelyben klasszikus pályák helyett megfigyelhető mennyiségek közötti matematikai kapcsolatok kerültek középpontba.

A Solvay-konferenciák egyik értéke éppen az volt, hogy a lezárt tudás ünneplése helyett a bizonytalan kérdéseket tették az asztalra. A résztvevők gyakran olyan problémákhoz nyúltak, amelyekben még nem létezett tankönyvi válasz. 1927-ben például senki sem tudta biztosan, hogy a hullámfüggvény ontológiai értelemben mit jelent. Azt sem, hogy a kvantummechanika statisztikai jellege végleges-e, vagy egy mélyebb, determinisztikus elmélet hiányának jele. A mai olvasó könnyen úgy tekinthet a konferenciára, mintha a később kanonizált kvantummechanika születésnapjára ünnepsége lett volna. A résztvevők azonban saját jelenükből néztek előre, és egyáltalán nem tudhatták, melyik elképzelés marad fenn.

A tanácskozás 1927. október 24-én kezdődött és 29-én zárult. A hivatalos jegyzőkönyv a következő évben jelent meg francia nyelven. A szerkezet beszédes: kevés nagy referátum mellett sok vita. William Lawrence Bragg a röntgensugarak kristályokon való visszaverődéséről, Arthur Compton a sugárzás elektromágneses elméletével fennálló kísérleti ellentmondásokról, Louis de Broglie az

új kvantumdinamikáról, Max Born és Werner Heisenberg a kvantummechanikáról, Erwin Schrödinger a hullámmechanikáról számolt be. Bohr komplementaritásról szóló szövege a kiadványban szerepelt, de a konferencián nem ugyanebben a formában hangzott el. A részletek azért fontosak, mert mutatják: a későbbi legendával ellentétben nem egyetlen Einstein–Bohr párbaj töltötte ki a hetet.

Solvay tudósparlamentje éppen attól vált történelmivé, hogy a fizika válságát nem próbálta gyorsan lezárni. A kérdéseket kitette az asztalra, és lehetővé tette, hogy a különböző iskolák képviselői egymás előtt kockáztassák a tévedést. A konferencia története így a tudomány működésének is példája: a forradalmakat ritkán egyetlen felismerés hozza létre. Elméletek, mérések, viták, matematikai eszközök és személyes kapcsolatok évekig tartó hálózata szükséges ahhoz, hogy egy új világkép megszilárduljon.

3. fejezet – Planck és a kétségbeesett kvantum

A kvantumforradalom történetét gyakran 1900. december 14-ével kezdik, amikor Max Planck Berlinben ismertette a fekete-test sugárzására vonatkozó új formulájának elméleti levezetését. A dátum utólag szimbolikus lett, de Planck számára nem egy forradalom bejelentését jelentette. Inkább kényszerű megoldást egy makacs problémára. A klasszikus fizika eszközeivel nem sikerült helyesen leírni, hogyan oszlik el a hőmérsékleti sugárzás energiája a különböző frekvenciák között. A nagyfrekvenciás tartományban a klasszikus számítások értelmetlen eredményhez vezettek.

Planck konzervatív alkat volt. Mélyen hitt a termodinamika és a klasszikus elmélet alapvető rendjében, és sokáig abban reménykedett, hogy a sugárzási probléma is beleilleszthető ebbe a keretbe. Amikor azonban az adatok egyre pontosabbá váltak, olyan matematikai feltételezést vezetett be, amelynek jelentőségét maga sem szívesen vállalta. Azt tételezte fel, hogy az anyag és a sugárzás közötti energiaátadás nem tetszőlegesen kis adagokban, hanem diszkrét egységekben történik. Az energia nagysága arányos a

frekvenciával, az arányossági tényező pedig azóta Planck-állandóként vált a fizika egyik alapvető konstansává.

A „kvantum” szó ebben az összefüggésben adagoltságot jelentett. A klasszikus képben egy rezgő rendszer energiája folytonosan változhatott. Planck számítása viszont úgy működött, mintha az energia egy lépcsősor fokain helyezkedne el. Hétköznapi méretekben a lépcsők olyan aprók, hogy a folyamat továbbra is folytonosnak látszik. Atomi méretekben azonban a kvantáltság már nem hanyagolható el. A természet bizonyos mennyiségei nem vehetnek fel akármilyen értéket.

Planck sokáig nem tekintette ezt a feltételezést a valóság közvetlen leírásának. Számára inkább formális eszköz volt. Ez a bizonytalanság fontos, mert megmutatja, milyen ritkán ismerik fel a nagy elméleti fordulatok szerzői azonnal saját ötletük teljes következményét. A kvantumfogalom radikális jelentését nem Planck, hanem nagyrészt Einstein kezdte kibontani. Mégis Planck volt az, aki először nyitotta ki azt az ajtót, amelyen később az egész klasszikus világkép megingott.

A fekete-test sugárzás problémája ma távolinak tűnhet, de a századfordulón a modern ipar és a precíziós mérés szorosan kapcsolódott hozzá. A fényforrások, kemencék és hőmérsékletmérés fejlődése gyakorlati igényt teremtett a sugárzás pontos megértésére. A kísérleti fizika olyan adatokat szolgáltatott, amelyekkel az elméletnek szembe kellett néznie. A kvantumelmélet tehát nem filozófiai spekulációként született. A természet egy jól körülhatárolható jelensége kényszerítette rá a fizikusokra.

Planck életében később tragédiák sorozata következett. Az első világháborúban elvesztette egyik fiát, két lánya szülés közben halt meg, másik fiát pedig a Hitler elleni 1944. július 20-i összeesküvéssel összefüggésben a náci rendszer kivégeztette. A tudós, aki 1927-ben a Solvay-fénykép első sorában ült, a német tudomány egyik legnagyobb tekintélyeként élte meg saját országának politikai összeomlását. A náci hatalomátvétel után igyekezett intézményi pozícióját felhasználni üldözött kollégák védelmére, de lehetőségei korlátozottak voltak.

Tudományos szempontból Planck különös helyet foglal el a kvantumforradalom történetében. Ő indította el, de nem ő vitte végig. A húszas évek fiatal fizikusainak

matematikai merészsége gyakran idegen volt számára. A Solvay-konferencián ezért egyszerre volt jelen alapítóként és egy olyan új világ tanújaként, amely már meghaladta az 1900-as kiindulópontot. A Planck-féle energiaadagokból 1927-re egy teljes mechanika nőtt ki, amely nemcsak az energia értékeit, hanem a mérhetőség, az okság és a valóság fogalmát is újragondolta.

Planck története arra is figyelmeztet, hogy a tudományos forradalmak nem feltétlenül forradalmárok művei. Egy konzervatív tudós is eljuthat olyan eredményhez, amely alapjaiban bontja le azt a rendszert, amelyet meg akart menteni. A kvantum születése nem egy ifjú lázadó kiáltványa volt, hanem egy pontos mérési görbe és egy elmélet összeegyeztethetlenségének következménye. A huszadik század egyik legnagyobb gondolati fordulata egy számítási kényszerből indult.

4. fejezet – Einstein és a fény részecskéi

Albert Einstein 1905-ös éve azért vált legendássá, mert néhány hónap alatt több olyan tanulmányt publikált, amelyek önmagukban is jelentős tudományos pályát alapoztak volna meg. A Brown-mozgás elemzése az atomok valóságának egyik legerősebb bizonyítékát adta, a speciális relativitáselmélet új alapokra helyezte a tér és az idő fogalmát, az energia és tömeg kapcsolatáról szóló rövid írás pedig később a modern fizika legismertebb képletéhez vezetett. A kvantumelmélet szempontjából azonban egy másik 1905-ös cikk volt döntő: Einstein a fotoelektromos jelenség magyarázatára azt javasolta, hogy maga a fény is energiakvantumokból állhat.

Ez sokkal radikálisabb lépés volt annál, amit Planck tett. Planck az anyag és a sugárzás energia-cseréjében alkalmazta a kvantálást, Einstein viszont a sugárzásnak tulajdonított részecskeszerű szerkezetet. A fény hullámtermészete addigra a fizika egyik legbiztosabb eredményének számított. Interferencia és diffrakció világosan hullámviselkedésre utalt. Einstein mégis úgy érvelt, hogy bizonyos jelenségekben a fény úgy

viselkedik, mintha lokalizált energiacsomagokból állna.

A fotoeffektusban fény hatására elektronok lépnek ki egy anyagból. A klasszikus hullámelmélet alapján az intenzívebb fénytől elsősorban nagyobb elektronenergiát lehetett volna várni. A kísérletek ehelyett azt mutatták, hogy az elektronok maximális energiája a fény frekvenciájától függ, és létezik olyan küszöbfrekvencia, amely alatt hiába növelik az intenzitást, nem történik elektronkilépés. Einstein modellje egyszerűvé tette a képet: egy fénykvantum energiája a frekvenciával arányos, és egy elektron egyetlen kvantum energiáját kaphatja meg.

A gondolat kezdetben sok ellenállásba ütközött. Még azok is óvatosak voltak, akik Einsteint nagyra tartották. A fény részecskeszerű viselkedése látszólag szembement a hullámelmélet több mint egy évszázados sikereivel. A probléma nem oldódott meg azzal, hogy az egyik képet lecserélték a másikkra. A huszadik század fizikájának egyik központi feladata éppen az lett, hogy megértse: miként lehet ugyanaz a jelenség hullámszerű és részecskeszerű is anélkül, hogy egyszerű klasszikus analógiákba szorítanánk.

Einstein kvantumelméleti szerepe azért különösen fontos, mert később gyakran a kvantummechanika ellenfeleként emlékeznek rá. Pedig a kvantumgondolat egyik legmerészebb úttörője volt. A fénykvantum mellett ő vizsgálta a szilárd testek fajhőjének kvantumos magyarázatát, és 1916–1917-ben a sugárzás elnyelésének és kibocsátásának olyan statisztikai elméletét dolgozta ki, amelyből később a lézerfizika alapfogalmai is kinőttek. 1924-ben gyorsan felismerte az indiai fizikus, Satyendra Nath Bose új statisztikájának jelentőségét, és kiterjesztette azt anyagi részecskékre.

Einstein tehát nem a kvantum ellen lázadt. A kérdés számára az volt, milyen típusú elméletnek kell a kvantumjelenségek mögött állnia. Elfogadta, hogy a természet klasszikus leírása elégtelen, de nehezen tudta elfogadni, hogy az alapvető fizikai elmélet végső formája csak a mérési kimenetek valószínűségeit adja meg. Híres, Max Bornhoz írt 1926-os levelében fogalmazta meg a „kockázó Isten” képét. A mondatot gyakran vallási hitvallásként idézik, holott inkább fizikai és filozófiai intuíciót fejezett ki: Einstein úgy gondolta, hogy a véletlenszerűnek látszó kvantumeredmények mögött mélyebb, teljesebb leírásnak kell léteznie.

A Solvay-konferencián Einstein ezért különleges helyzetben volt. A fiatalabb generáció számára ő volt az a tudós, aki több klasszikus alapelvet már korábban felülírt, és mégis ő lett az új kvantummechanika egyik legmakacsabb kritikusa. Ez azonban nem egyszerű konzervativizmusból fakadt. Einstein saját forradalmi tapasztalata alapján éppen azt várta egy alapelmélettől, hogy világosan fogalmazza meg, mi létezik, és hogyan függnek össze a fizikai mennyiségek a megfigyelőtől függetlenül. A kvantummechanika formalizmusa szerinte lenyűgözően sikeres volt, de nem feltétlenül teljes.

Ebből a feszültségből született meg az Einstein-Bohr vita, amely a tudománytörténet egyik legtöbbet idézett párbeszédévé vált. A vita erejét az adta, hogy nem a kísérleti adatok elfogadásáról szólt. Mindketten ugyanazokat a méréseket ismerték, és mindketten elfogadták az új elmélet gyakorlati erejét. Abban különböztek, mit tekintettek a fizika végső feladatának. Einstein a valóság teljesebb képét kereste. Bohr azt állította, hogy atomi szinten a klasszikus fogalmak alkalmazhatóságának határai maguk is a fizikai helyzet részévé válnak.

A brüsszeli csoportképen Einstein nyugodtan ül, de az előző két évtized története alapján ő a

kvantumforradalom egyik paradox alakja. Elindította a fénykvantumot, majd később évtizedeken át próbálta megmutatni, hogy a kvantummechanika uralkodó értelmezése nem lehet az utolsó szó. Végül éppen ezek a kifogások segítettek olyan kérdéseket élesen megfogalmazni, amelyekből a huszadik század második felének kvantumalap-kísérletei és a kvantuminformatika egy része kinőtt.

5. fejezet - Rutherford atomja és Bohr ugrása

A huszadik század elején az atom egyszerre volt bizonyosság és rejtély. A kémia régóta atomokkal számolt, a kinetikus gázelmélet sikeresen magyarázott számos jelenséget, mégis sok tekintélyes tudós vonakodott attól, hogy az atomokat közvetlen fizikai valóságnak tekintse. A helyzet gyorsan megváltozott az elektron felfedezésével, a radioaktivitás kutatásával és Ernest Rutherford kísérleteivel. Az atom többé nem lehetett egyszerű, oszthatatlan építőkocka. Belső szerkezettel rendelkezett, és ennek a szerkezetnek az értelmezése az elméleti fizika egyik fő feladatává vált.

Rutherford manchesteri csoportjának híres szórási kísérleteiben alfa-részecskéket irányítottak vékony fémfóliákra. A részecskék többsége alig térült el, néhány azonban nagy szögben visszaszóródott. Ebből Rutherford arra következtetett, hogy az atom pozitív töltése és tömegének jelentős része nagyon kis központi tartományban, az atommagban összpontosul. A modell látványosan különbözött J. J. Thomson korábbi elképzelésétől. Az atom immár miniatűr bolygórendszerre emlékeztetett: középen a pozitív mag,

körülötte elektronok.

A hasonlat ugyanakkor azonnal súlyos problémát teremtett. A klasszikus elektrodinamika szerint egy gyorsuló elektromos töltés sugárzást bocsát ki és energiát veszít. Egy körpályán mozgó elektron tehát folyamatosan sugározna, pályája egyre kisebb lenne, végül pedig az atommagba zuhanna. A Rutherford-atom klasszikus értelemben instabil. Ezenfelül nem magyarázta meg az atomok vonalas színeképeit sem. Ha az elektron energiája folyamatosan változhatna, a kibocsátott fény frekvenciáinak is folytonos tartományt kellene alkotniuk. A kísérletek viszont meghatározott spektrumvonalakat mutattak.

Niels Bohr 1912-ben érkezett Rutherford manchesteri laboratóriumába. A fiatal dán fizikus merészen összekapcsolta Rutherford atommodelljét Planck kvantumgondolatával. 1913-as tanulmányaiban azt feltételezte, hogy az elektronok csak bizonyos megengedett pályákon mozoghatnak anélkül, hogy sugároznának. Fény akkor keletkezik vagy nyelődik el, amikor az elektron egyik állapotból a másikba ugrik, a kibocsátott vagy elnyelt energia pedig a két állapot energiakülönbségének felel meg.

Bohr elmélete a hidrogén színeképét meglepő pontossággal magyarázta. Ez óriási siker volt, de a modell alapjai különösen furcsák maradtak. Miért lennének bizonyos pályák engedélyezettek, mások tiltottak? Mi történik az „ugrás” közben? Hogyan illeszthető össze az elektron klasszikus pályája és a nem klasszikus átmenet? Bohr válasza részben az úgynevezett megfelelési elvben rejlett. A kvantumelméletnek nagy kvantumszámok és makroszkopikus viszonyok határán vissza kell adnia a klasszikus fizika eredményeit. Az új elmélet nem eltörli a régit, hanem kijelöli azt a tartományt, ahol a klasszikus leírás továbbra is jól működik.

Az 1910-es és 1920-as évek elején kialakult „régikvantumelmélet” számos részproblémát sikeresen kezelt, de egyre több toldozásra szorult. Sommerfeld elliptikus pályákat és további kvantumszámokat vezetett be, mások a mágneses térben felhasadó spektrumvonalak magyarázatán dolgoztak. A rendszer időnként lenyűgöző előrejelzéseket adott, máskor viszont már egyszerűbb atomok esetén is kudarcot vallott. A szabályok gyűjteménye mögött nem látszott egységes mechanika.

Bohr jelentősége ezért túlmutat az 1913-as atommodellen. Koppenhágai intézetében olyan

nemzetközi műhelyt hozott létre, ahol a fiatal elméleti fizikusok szabadon vitatkozhattak. Heisenberg, Pauli, Kramers és sokan mások megfordultak ott. Bohr különleges munkamódszerrel dolgozott. Ritkán fogalmazott gyorsan; mondatokat újra és újra átdolgozott, kollégáival órákig vitatott egyetlen fogalomról. A fizikát nem pusztán számításnak tekintette. Azt kereste, milyen nyelven beszélhetünk következetesen olyan jelenségekről, amelyek nem illeszkednek a klasszikus fogalmakhoz.

1927-re Bohr már nem a régi atommodell védelmezője volt. Saját korábbi képének elégtelenségét ő is pontosan látta. A fiatalabbak matematikai áttörései után feladata inkább az lett, hogy értelmezze az új formalizmust. Ebből nőtt ki a komplementaritás gondolata. Bohr szerint ugyanazon kvantumobjektum különböző kísérleti elrendezésekben hullám- vagy részecskeszerű tulajdonságokat mutathat. Ezek a leírások klasszikus értelemben kizárják egymást, de együtt szükségesek a jelenségek teljes leírásához.

Einstein számára ez a megközelítés túl sokat mondott le a megfigyelőtől független fizikai valóságról. Bohr viszont úgy látta, hogy éppen a kvantumjelenségek kényszerítenek arra, hogy feladjuk a klasszikus intuíció

korlátlan alkalmazását. Kettejük későbbi vitája tehát egy hosszabb fejlődés végpontja volt. A Rutherford-féle bolygóatom problémájától eljutottak oda, hogy már maga a „pálya” fogalma is kérdésessé vált.

Bohr ugrása 1913-ban még azt mondta: vannak megengedett pályák, és közöttük kvantumugrások történnek. Az 1927-es kvantummechanika ennél radikálisabb lett. Nem az volt a fő kérdés, melyik pályán van az elektron, hanem hogy egyáltalán értelmes-e a klasszikus pálya fogalmát hozzárendelni ahhoz, ami a mérés előtt történik. Ez a változás készítette elő a brüsszeli viták egyik legmélyebb rétegét.

6. fejezet – De Broglie és az anyag hullámai

Louis de Broglie az 1927-es fényképen a második sorban ül, Arthur Compton és Max Born között. Harmincöt éves, arisztokrata családból származik, és pályája sem a szokványos úton indult. Eredetileg történelmet tanult, csak később fordult a fizika felé. Az első világháború alatt rádiókommunikációval foglalkozott az Eiffel-toronymál. Talán éppen ez a háttér tette fogékonnyá arra a gondolatra, hogy a hullám és a részecske közötti határt ne tekintse véglegesnek.

Einstein fénykvantum-elmélete különös aszimmetriát hozott létre. A fényről régóta tudták, hogy hullámszerű, mégis részecskeszerű jelenségeket is mutatott. De Broglie 1923–1924 körül feltette a kérdést: miért ne lehetne ez fordítva is igaz? Ha a hullámnak tekintett fény részecskejellegét mutathat, akkor a részecskének tekintett elektronhoz miért ne tartozhatna hullám?

Doktori értekezésében az anyagi részecskékhez hullámhosszt rendelt. A kapcsolatban Planck állandója ismét kulcsszerepet kapott: a részecske impulzusa és a hozzá társított hullám hullámhossza fordítottan arányos. A gondolat egyszerű formulában foglalható össze,

következménye azonban radikális. Az elektron többé nem kizárólag apró golyó. Bizonyos kísérletekben hullámként terjed és interferálhat.

A hipotézis kezdetben merész spekulációnak tűnt. Einstein azonban felfigyelt rá, és támogatta de Broglie munkáját. Néhány éven belül az elektrondiffrakció kísérleti bizonyítékot szolgáltatott. Clinton Davisson és Lester Germer kristályról szórt elektronjai interferenciamintázatot adtak, George Paget Thomson pedig vékony fóliákon áthaladó elektronokkal talált hasonló eredményt. Az elektron hullámtermészete nem filozófiai metafora maradt, hanem mérhető jelenség lett.

De Broglie azonban nem elégedett meg pusztán azzal, hogy hullámhosszt rendeljen a részecskékhez. Olyan elméletet képzelt el, amelyben a részecske ténylegesen létezik és meghatározott pályát követ, miközben egy hozzá kapcsolódó hullám vezeti. Ez a „pilotahullám” vagy vezetőhullám-elképzelés determinisztikus alternatívát kínált a kialakuló valószínűségi értelmezéssel szemben. Az ötödik Solvay-konferencián de Broglie ezt a gondolatot mutatta be.

A későbbi tankönyvi elbeszélések sokáig mellékszálak tekintették ezt a programot. A

konferencián Wolfgang Pauli kritikus kérdést tett fel a többtest-problémával kapcsolatban, de a történet nem azzal zárult, hogy de Broglie elmélete egyszerűen cáfolatot kapott. Inkább arról volt szó, hogy a fiatal francia fizikus nem tudta minden részletében kidolgozni a programot, miközben a Born-Heisenberg-Bohr-féle megközelítés intézményi és elméleti fölénybe került. De Broglie később egy időre fel is adta saját értelmezését, majd David Bohm 1952-es munkája után ismét visszatért hozzá.

Ez a történet fontos korrekció a „Bohr legyőzte Einsteint” típusú egyszerű narratívákhoz. 1927-ben több elképzelés versenyzett arról, hogyan kell a kvantummechanikát érteni. De Broglie programja azt mutatja, hogy a kvantumjelenségek elfogadása nem feltétlenül jelentette a determinisztikus valóságkép feladását. Lehetett úgy is gondolkodni, hogy a részecskéknek meghatározott helyük és mozgásuk van, csak ezeket egy nem klasszikus hullám vezérli.

A pilotahullám-elmélet modern változata ma Bohm-mechanikaként ismert. Nem ez a kvantummechanika legelterjedtebb értelmezése, de fontos szerepet játszik az alapok vitájában. A huszadik század második felének fejlődése megmutatta, hogy de

Broglie kérdése nem volt naiv zsákutca. Egy konzisztens kvantumelmélet kialakítható úgy is, hogy a részecskéknek pályát tulajdonítunk, bár ennek ára a nemlokalitás nyílt elfogadása és egy olyan hullámfüggvény, amely nem a hétköznapi háromdimenziós térben, hanem a rendszer konfigurációs terében él.

Brüsszelben azonban még nem lehetett látni ezt a jövőt. A résztvevők számára de Broglie elsősorban az a fiatal elméleti fizikus volt, akinek anyaghullámai közvetlenül inspirálták Schrödingert. Néhány év alatt az ötlet a kvantummechanika egyik alapvető elemévé vált, miközben saját szerzőjének részletes értelmezése háttérbe szorult. A tudomány történetében nem ritka az ilyen irónia: egy gondolat győz, de más jelentéssel, mint ahogyan megalkotója elképzelte.

De Broglie alakja azért is fontos a csoportképen, mert összeköti Einsteint és Schrödingert. Einstein a fényt tette részecskeszerűvé, de Broglie az anyagot hullámszerűvé, Schrödinger pedig ebből a hullámgondolatból épített új mechanikát. A hullám és részecske közötti klasszikus választóvonal néhány év alatt feloldódott. Nem az derült ki, hogy minden valójában hullám, vagy minden valójában részecske. Inkább az, hogy a mikroszkopikus

világ nem engedi magát maradéktalanul egyik klasszikus kategóriába sem bezárni.

HÁTTÉRGYÁR

7. fejezet – Helgoland: amikor eltűntek az elektronpályák

1925 nyarán Werner Heisenberg allergiás rohamai elől az Északi-tenger kopár Helgoland szigetére utazott. A történet később a tudományos legendák egyik kedvelt jelenetévé vált: a fiatal fizikus egy sziklás szigeten, távol a virágportól és a városi zavaró tényezőktől, éjszakákon át számol, majd hajnali fényben felismeri, hogy egy új mechanika matematikája működik. A későbbi visszaemlékezések színezhetik a jelenetet, a lényeg azonban jól dokumentált: Heisenberg 1925-ös munkája szakított az atomon belüli klasszikus pályák közvetlen ábrázolásával.

A régi kvantumelmélet egyre nehezebben kezelte a bonyolultabb atomokat. Heisenberg radikális döntést hozott: csak olyan mennyiségekkel akart dolgozni, amelyek valamilyen módon megfigyelhető átmenetekhez kapcsolhatók. Az elektron feltételezett pályáját nem tekintette ilyen mennyiségnek. A klasszikus koordináták helyett az energiaszintek közötti átmenetek frekvenciáit és intenzitásait helyezte a középpontba.

A matematika szokatlan formát öltött. Max Born felismerte, hogy Heisenberg számítási táblázatai

lényegében mátrixok, olyan matematikai objektumok, amelyeknek a szorzása általában nem felcserélhető. Born és Pascual Jordan, majd Heisenberg közreműködésével megszületett a mátrixmechanika. A nem kommutáló mennyiségek később közvetlenül kapcsolódtak a határozatlansági relációkhoz: ha két fizikai mennyiséghez tartozó operátor sorrendje számít, akkor a két mennyiség nem rendelkezhet egyszerre tetszőlegesen éles értékkel.

A módszer matematikailag hatékony volt, de intuitív képet alig adott. Ez zavarta Einsteint és Schrödingert, de eleinte magát Heisenberget sem hagyta teljesen nyugodtan. A fizikusok klasszikus neveltetése arra ösztönözte őket, hogy valamilyen térbeli folyamatot lássanak az egyenletek mögött. A mátrixmechanika ehelyett azt sugallta, hogy az atom világában a közvetlenül elképzelt pálya talán nem alapfogalom.

Heisenberg szellemi hátterében Arnold Sommerfeld müncheni iskolája és Bohr koppenhágai intézete egyaránt fontos volt. Sommerfeld rendkívül erős matematikai képzést adott tanítványainak. Bohr viszont állandó fogalmi vitákra kényszerítette őket. Heisenberg egyszerre volt számoló virtuóz és filozófiai kérdésekre fogékony fizikus. A kettő 1925 után különösen

termékenyen találkozott.

Az új mechanika gyorsan terjedt. Pauli a hidrogénatom problémájára alkalmazta, és megmutatta, hogy a formalizmus visszaadja a megfelelő energiaszinteket. Dirac Cambridge-ben saját matematikai nyelven fogalmazta újra az elméletet. A kvantummechanika néhány hónap alatt nem egyetlen ember eredménye, hanem nemzetközi hálózat közös alkotása lett. Göttingen, Koppenhága és Cambridge között levelek, kéziratok és látogatások forogtak.

A gyorsaság lenyűgöző. 1924-ben még a régi kvantumelmélet toldozása zajlott. 1925 végére már létezett egy új, általános mechanikai formalizmus. 1926-ban Schrödinger egy egészen más nyelven, differenciálegyenletekkel és hullámokkal ugyanazokhoz az eredményekhez jutott. Rövidesen kiderült, hogy a két megközelítés matematikailag ekvivalens. A fizikusok előtt tehát nem az a kérdés állt, melyik számítás működik, hanem hogy mit jelent a közös formalizmus.

Heisenberg pályája 1927-ben újabb nagy lépéshez érkezett. Koppenhágában dolgozva megfogalmazta a határozatlansági relációt, amely azóta nevével forrt össze. A reláció nem a mérőeszközök ügyetlenségét fejezi

ki. A kvantumelmélet matematikai szerkezete szab határt annak, hogy bizonyos mennyiségpárok milyen pontossággal lehetnek egyidejűleg meghatározottak.

A huszonöt éves Heisenberg ezért a Solvay-konferenciára már a kvantummechanika egyik fő szerzőjeként érkezett. Max Bornnal közösen olyan előadást tartott, amelyben a kvantummechanika lényegi lezártóságát hangsúlyozták. A magabiztosság érthető volt: az elmélet sorra oldotta meg azokat a problémákat, amelyekkel a régi kvantumelmélet küszködött. A filozófiai következmények azonban korántsem voltak lezártak.

Helgoland története ezért nemcsak egy zseniális felismerés története. Jelképe annak a pillanatnak, amikor a fizika lemondott arról, hogy a mikroszkopikus világot mindenáron a klasszikus mechanika képeivel írja le. Az elektronpálya eltűnése a számításból olyan gondolati törés volt, amely nélkül az 1927-es vita sem érthető. Einstein éppen azt kérdezte újra és újra: ha a pályát nem írjuk le, akkor azért nem tesszük, mert nem is létezik, vagy csak azért, mert az elméletünk nem fér hozzá?

8. fejezet – Schrödinger hullámai

Erwin Schrödinger számára Heisenberg mátrixmechanikája visszatetsző volt. Nem elsősorban azért, mert ne értette volna a matematikai tartalmát, hanem mert túl absztraktnak és szemléletellenesnek érezte. A fizika hagyományosan térben és időben zajló folyamatokról beszélt. Schrödinger olyan elméletet keresett, amely visszaadhat valamit ebből a folytonosságból. De Broglie anyaghullámai kínálták a kiindulópontot.

1925 végén és 1926 elején Schrödinger olyan egyenletet dolgozott ki, amely azóta a kvantummechanika egyik alapegyenlete. A hullámfüggvény időbeli és térbeli változását írta le, és a megfelelő peremfeltételekkel az atomok megengedett energiaértékei természetes módon jelentek meg. A régi kvantumelméletben a megengedett pályák kvantálását külön szabályként kellett bevezetni. Schrödinger képe szerint az energiaszintek úgy származtak az egyenletből, ahogyan egy kifeszített húron csak bizonyos állóhullámok lehetségesek.

Ez a megközelítés sok fizikus számára megkönnyebbülést hozott. A mátrixok rideg absztrakciója helyett hullámok jelentek meg, amelyekről lehetett valamilyen térbeli képet alkotni. Schrödinger maga abban reménykedett, hogy a kvantumugrások diszkontinuitását is feloldhatja, és a részecskejelleg mögött végső soron folytonos hullámfolyamat áll.

A remény azonban csak részben teljesült. A több részecskét leíró hullámfüggvény nem a megszokott háromdimenziós térben él, hanem egy sokdimenziós konfigurációs térben. Még fontosabb, hogy Max Born hamarosan olyan értelmezést adott neki, amely Schrödinger eredeti realista hullámképétől eltért. Born szerint a hullámfüggvény abszolútértékének négyzete a lehetséges mérési eredmények valószínűségét határozza meg. A hullám nem feltétlenül valamiféle szétterülő anyagot jelent; inkább a kimenetek esélyeiről ad információt.

Schrödinger és Heisenberg elméletéről rövidesen kiderült, hogy matematikailag ekvivalensek. Ez különös helyzetet teremtett. Két egészen más intuícióból született formalizmus ugyanazokat a fizikai eredményeket adta. A különbség részben reprezentáció kérdése lett, de az értelmezési feszültség nem tűnt el. Schrödinger továbbra

is idegenkedett attól, hogy a természet alapvető leírását pusztán valószínűségekre redukálják.

1927-ben Schrödinger Berlinbe költözött, ahol Max Planck utódja lett. Ez a kinevezés jól mutatta tudományos tekintélyét. A Solvay-konferencián saját hullámmechanikájáról tartott referátumot. A fényképen Heisenberghez és Paulihoz közel áll, de intellektuálisan nem tartozott ugyanahhoz a táborhoz. A kvantummechanika sikereiben osztozott velük, a koppenhágai jellegű értelmezéssel azonban egyre kevésbé békült meg.

Nyolc évvel később, 1935-ben Schrödinger dolgozta ki azt a gondolat kísérletet, amely később a kvantumelmélet egyik legismertebb populáris képévé vált. A macska zárt dobozban van, sorsát egy kvantum eseményhez kötött mechanizmus dönti el. A kvantumformalizmus lineáris szuperpozícióját a teljes rendszerre alkalmazva a macska élő és halott állapotának kombinációjához jutunk. Schrödinger nem azért találta ki a macskát, hogy a kvantummechanika furcsaságát ünnepelje. Éppen ellenkezőleg: az volt a célja, hogy megmutassa, milyen abszurd következményhez vezethet a mikroszkopikus szuperpozíció közvetlen kiterjesztése a hétköznapi világra.

A macska azért élte túl a tudománytörténeti kontextusát, mert egyetlen képpel sűríti össze a mérési probléma nehézségét. Ha a kvantumrendszer több lehetőség szuperpozíciójában van, mikor és hogyan kapunk egyetlen határozott eredményt? A hagyományos koppenhágai nyelv gyakran a méréshez kötötte a váltást, de pontosan mi számít mérésnek? Hol húzódik a kvantumrendszer és a klasszikus mérőeszköz határa? Ezek a kérdések 1927-ben még nem a macska formájában jelentek meg, de a feszültség már jelen volt.

Schrödinger későbbi pályája a politikai töréseket is tükrözte. Hitler hatalomra jutása után nem akart a náci Németországban maradni. Oxfordba ment, később Grazban dolgozott, majd az Anschluss után ismét távoznia kellett. Végül Éamon de Valera meghívására Dublinban kapott menedéket, ahol az Institute for Advanced Studies egyik meghatározó alakja lett. Itt írta meg a *Mi az élet?* című könyvét is, amely nagy hatással volt a molekuláris biológia következő nemzedékére.

A Solvay-fényképen Schrödinger a kvantummechanika egyik alapítója, aki már akkor sem volt elégedett azzal, ahogyan saját elméletét sokan értelmezték. Ez a paradoxon később még hangsúlyosabbá vált. A Schrödinger-egyenlet a modern fizika egyik legszélesebb

körben használt eszköze, miközben szerzője egész életében kényelmetlenül érezte magát a valószínűségi ortodoxia mellett. A kvantumforradalom története itt is megmutatja, hogy az egyenlet megalkotása és jelentésének elfogadása két külön folyamat.

9. fejezet – Max Born és a valószínűség belépése

Ha a kvantummechanika történetét csak a legismertebb nevekkel mesélik el, Max Born gyakran kevesebb figyelmet kap, mint Einstein, Bohr, Heisenberg vagy Schrödinger. Pedig az új elmélet egyik legmélyebb fordulata az ő nevéhez kapcsolódik. Göttingenben nemcsak Heisenberg matematikai áttörésének felismerésében játszott döntő szerepet, hanem 1926-ban a hullámfüggvény statisztikai értelmezését is ő fogalmazta meg.

Born kiváló matematikai érzékkel rendelkező fizikus volt, aki tudatosan épített erős elméleti iskolát Göttingenben. A város egyeteme a matematika egyik világszínvonalú központja volt. David Hilbert, Felix Klein és más nagy matematikusok környezetében a fizikusok számára természetes volt absztrakt módszerekkel dolgozni. Amikor Heisenberg 1925-ös kézírata megérkezett, Born felismerte, hogy a furcsa szorzási szabályok a mátrixalgebrához kapcsolódnak. Pascual Jordannal együtt gyorsan kidolgozta a formalizmust.

Az igazi filozófiai fordulat azonban Schrödinger hullámegyenlete után következett. Ha a hullámfüggvény

valóságos anyaghullám, akkor mit jelent egy elektron szóródásakor? Born a részecskeütközések elméletén dolgozva arra jutott, hogy a hullámfüggvény nem maga az anyag eloszlása, hanem a lehetséges kimenetek valószínűségét határozza meg. A mérés egyedi eredményét az elmélet nem jósolja meg biztosan; csak azt mondja meg, milyen gyakorisággal várhatók az egyes kimenetek sok ismétlésben.

Ez a lépés mélyebb volt, mint elsőre látszik. A klasszikus statisztikai fizikában a valószínűséget rendszerint tudatlanságunk jeleként használjuk. Ha nem ismerjük pontosan minden gázmolekula helyzetét és sebességét, statisztikai leírást alkalmazunk, de elvben feltételezzük, hogy mindegyiknek meghatározott állapota van. Born értelmezésében viszont a kvantumvalószínűség nem feltétlenül pusztán hiányos tudás. Az elmélet szerkezete szerint az egyedi esemény kimenetele önmagában nem következik determinisztikusan a hullámfüggvényből.

Einstein számára éppen ez volt az egyik fő probléma. Bornnal régi barátságot ápolt, levelezésük évtizedeken át folytatódott. A híres „Isten nem kockázik” megjegyzést is Bornnak írta. A barátságuk azért különösen tanulságos, mert személyes tisztelet és alapvető tudományos

nézetkülönbség egyszerre fért meg benne. Einstein nem vitatta Born számításainak használhatóságát, de nem hitte, hogy a valószínűségi leírás a természet végső szintjét jelenti.

Born statisztikai értelmezése ma a kvantummechanika tankönyvi alapelve. A hullámfüggvényből vagy állapotvektorból számított amplitúdók négyzetei adják a mérési kimenetek valószínűségeit. Ez a szabály elképesztő pontossággal működik. Ugyanakkor rögtön felveti a mérési problémát: ha az elmélet folytonosan, determinisztikusan fejleszti a hullámfüggvényt, miként jutunk a méréskor egyetlen konkrét eredményhez?

A későbbi értelmezések különböző válaszokat adtak. A koppenhágai tradíció a mérési elrendezés és a klasszikus leírás szerepét hangsúlyozta. A sokvilág-értelmezés nem vezet be külön összeomlást, hanem minden eredményt a teljes hullámfüggvény külön ágaiban tart meg. A Bohm-mechanika részecskepályákat és vezető hullámot feltételez. Objektív összeomlási modellek fizikai folyamatként módosítanak az egyenletet. A vita mindmáig nem zárult le, miközben Born valószínűségi szabálya valamennyi gyakorlati kvantumszámítás központi eleme.

Born személyes sorsa szintén összekapcsolódott Európa politikai szétesésével. Zsidó származása miatt 1933-ban elveszítette göttingeni állását. Nagy-Britanniába emigrált, végül Edinburgh-ban kapott professzori posztot. Csak 1954-ben kapta meg a Nobel-díjat, többek között a hullámfüggvény statisztikai értelmezéséért. Mire Stockholmban kitüntették, a kvantummechanika már évtizedek óta a fizika alapvető eszköze volt.

A brüsszeli képen Born Bohr mellett ül. A hely akár szimbolikus is lehetne, bár természetesen semmi szükség nincs ilyen utólagos jelentést tulajdonítani az ülésrendnek. Mégis jól kifejezi a történetet: Born adta meg azt a matematikai-statisztikai kulcsot, amelyhez Bohr filozófiai értelmezése kapcsolódhatott. Heisenberg mátrixai, Schrödinger hullámai és Born valószínűsége együtt alakították ki azt az elméleti rendszert, amely 1927-ben Brüsszelbe érkezett.

10. fejezet – Heisenberg határozatlansága

A „határozatlansági elv” a kvantummechanika legismertebb kifejezései közé tartozik, és egyben az egyik leggyakrabban félreértett is. Hétköznapi nyelvben gyakran úgy idézik, mintha azt jelentené, hogy minden bizonytalan, a megfigyelés mindig zavarja a rendszert, ezért semmit sem tudhatunk pontosan. Heisenberg 1927-es eredménye ennél sokkal konkrétabb és szigorúbb. Bizonyos fizikai mennyiségpárok, például hely és impulzus esetében a kvantumállapot nem tehető úgy tetszőlegesen élessé, hogy mindkettő egyszerre pontosan meghatározott legyen.

A mátrixmechanikában ennek matematikai gyökere a nem kommutáló operátorokban rejlik. A hely és az impulzus operátorának sorrendje nem cserélhető fel következmény nélkül. Ebből levezethető egy alsó korlát a két mennyiség szórásának szorzatára. A határban Planck redukált állandója jelenik meg, ami jelzi: a jelenség valóban a kvantumvilághoz tartozik.

Heisenberg saját 1927-es cikkében híres gondolat kísérletet használt, a gamma-sugaras mikroszkópot. Egy elektron helyzetét nagyon rövid

hullámhosszú fénnel próbáljuk meghatározni. Minél rövidebb a hullámhossz, annál pontosabb lehet a helymeghatározás, de a foton kölcsönhatása annál nagyobb és bizonytalanabb impulzust ad az elektronnak. A szemléletes kép azt sugallta, hogy a mérés beavatkozása okozza a bizonytalanságot.

Bohr azonban nem volt teljesen elégedett ezzel a magyarázattal. Szerinte a kérdés mélyebb: a hullám- és részecsketulajdonságok, valamint a mérési elrendezések egymást kiegészítő jellege miatt bizonyos klasszikus fogalmak nem alkalmazhatók egyszerre korlátlan pontossággal. Kettejük vitája 1927 elején igen éles volt. Heisenberg később maga is felidézte, milyen érzelmileg megterhelő volt a konfliktus. A koppenhágai iskola tehát korántsem egységes tanításként született. Bohr és Heisenberg éppen a kulcsfogalmakon vitatkoztak.

A határozatlansági reláció jelentősége túlmutat a mérés technikáján. A klasszikus mechanikában, ha egy részecske helyét és sebességét pontosan ismerjük, az egyenletek elvben meghatározzák jövőbeli mozgását. Pierre-Simon Laplace híres gondolata szerint egy mindent tudó értelem a világegyetem jelenlegi állapotából kiszámíthatná a múltat és a jövőt. A kvantummechanika ennél mélyebb korlátot állít e

program elé: maga az állapotleírás sem tartalmaz egyszerre tetszőlegesen pontos hely- és impulzusértéket.

Ez nem jelenti azt, hogy a kvantummechanika minden értelemben rendezetlen vagy kiszámíthatatlan. A hullámfüggvény időfejlődését az egyenlet determinisztikusan adja meg. A bizonytalanság és a valószínűség a mérési eredmények kapcsolatában jelenik meg. Éppen ez a kettősség tette a kérdést filozófiailag nehézé: az állapot szabályosan fejlődik, de az egyedi mérési eredmény csak valószínűségi módon jósolható.

Einstein számára a határozatlansági reláció nem volt egyszerűen hibás állítás. Elfogadta a kvantummechanika keretein belül érvényes matematikai kapcsolatot. A kérdése az volt, hogy ez a természet teljes leírásának végső határa-e. Lehetséges-e olyan mélyebb elmélet, amelyben a részecskéknek mégis vannak meghatározott tulajdonságaik, csak a kvantummechanika nem tartalmazza őket? A későbbi rejtett változós elméletek és Bell tétele részben ezt a problémát fogalmazta újra.

A mindennapi világban a Planck-állandó kicsinysége miatt a határozatlansági korlát többnyire észrevehetetlen. Egy labda vagy autó helyét és sebességét olyan pontossággal lehet egyszerre ismerni,

hogy a kvantumhatás gyakorlati jelentősége elhanyagolható. Egy elektron esetében azonban ugyanaz a korlát meghatározó. Az atom stabilitása, az elektronok energiaszintjei, a kémiai kötések és az anyag szerkezete mind olyan kvantumos tulajdonságokhoz kapcsolódnak, amelyekben nincs klasszikus értelemben vett, tetszőleges pontosságú mikroszkopikus pálya.

Heisenberg eredménye ezért nem a tudatlanság dicsérete. Ellenkezőleg: pontos matematikai állítás arról, milyen szerkezetű tudás lehetséges a kvantumelméletben. A fizikában ritka pillanat, amikor egy elmélet nemcsak azt mondja meg, mit tudunk kiszámítani, hanem azt is, milyen kérdések nem rendelkezhetnek a klasszikus értelemben egyszerre tetszőleges pontosságú válasszal.

1927 októberére Heisenberg ezt a felismerést már magával vitte Brüsszelbe. A konferencia résztvevői az új számítási technikán túl arról is vitatkoztak, hogy a természet milyen tulajdonságairól beszélhetünk egyáltalán értelmesen. A határozatlansági reláció ebben a vitában nem lezárás, hanem új kérdések forrása lett.

11. fejezet - Bohr komplementaritása

Niels Bohr 1927 szeptemberében, néhány héttel a brüsszeli Solvay-konferencia előtt a Comói-tó mellett rendezett nemzetközi fizikai kongresszuson fogalmazta meg nyilvánosan a komplementaritás gondolatát. A kifejezés később az ő nevével és a „koppenhágai értelmezéssel” forrt össze, de maga a koncepció fokozatosan alakult. Bohr nem egyetlen matematikai képlettel akarta megoldani a kvantummechanika értelmezési problémáját. Inkább azt próbálta tisztázni, hogyan használhatók a klasszikus fizika fogalmai egy olyan tartományban, ahol azok önmagukban elégtelenek.

A komplementaritás legismertebb példája a hullám- és részecskeleírás. Egy elektron interferenciakísérletben hullámszerű mintázatot adhat, más mérési elrendezésben lokalizált részecskeként detektáljuk. A klasszikus fizikában a két kép nehezen egyeztethető össze. Bohr szerint azonban nem arról van szó, hogy az elektron titokban hol hullám, hol részecske, és csak ki kell deríteni, éppen melyik. A két leírás különböző kísérleti feltételekhez tartozik, és együtt adja a jelenség teljesebb kvantumfizikai leírását.

Bohr számára a mérőberendezés nem külső, jelentéktelen technikai részlet. A kvantumjelenség definíciójához hozzátartozik az a kísérleti elrendezés, amelyben megfigyeljük. Ha úgy rendezünk be egy kísérletet, hogy információt kapjunk arról, melyik úton haladt egy részecske, ezzel olyan feltételeket hozunk létre, amelyek mellett az interferenciamintázat eltűnik. A megfigyelhető tulajdonságok tehát nem választhatók le teljesen a mérési kontextusról.

Ez a gondolat könnyen vezet félreértéshez. Bohr nem azt állította, hogy az emberi tudat teremti a valóságot. A mérési elrendezés fizikai berendezés, nem pszichológiai aktus. Ugyanakkor ragaszkodott ahhoz, hogy a kísérleti eredményeket klasszikus fogalmakkal kell közölnünk: detektor helyéről, időpontról, impulzusról, műszerek állásáról beszélünk. A kvantummechanika nem szünteti meg a klasszikus nyelvet, hanem korlátozza annak egyidejű alkalmazhatóságát.

Einstein kritikája mélyen érintette ezt a kérdést. Számára a fizikai elmélet ideális esetben a rendszer tulajdonságait attól függetlenül írja le, hogy éppen milyen mérést végzünk rajta. Bohr úgy gondolta, az atomi jelenségeknél ilyen teljes leválasztás nem tartható fenn. A mérőrendszer és a vizsgált rendszer közötti

kölcsönhatás nem hagyható figyelmen kívül, és bizonyos kísérleti feltételek kölcsönösen kizárják egymást.

A két gondolkodásmód közti különbség mélyebb volt technikai nézeteltérésnél. Einstein realizmusa azt kereste, milyen elemei vannak a valóságnak a megfigyeléstől függetlenül. Bohr óvatosabban használta a „valóság” szót, és a fizikát elsősorban a jelenségek közölhető, kísérletileg meghatározott leírásához kötötte. Később sok filozófus és fizikus különböző módokon értelmezte ezt a különbséget, időnként olyan állításokat tulajdonítva Bohrnak, amelyek saját szövegeiben ennél árnyaltabban jelennek meg.

A komplementaritás ereje abban állt, hogy fogalmi keretet adott a kvantummechanika működéséhez anélkül, hogy mindenáron klasszikus mikroszkopikus képet követelt volna. A gyakorlatban a fizikusok számára ez felszabadító lehetett. Nem kellett minden mérés között egyetlen klasszikus pályát kijelölniük az elektronnak. Elég volt helyesen megadni az állapotot, az operátorokat és a mérési eredmények valószínűségeit.

A módszertani siker azonban nem jelentett filozófiai konszenzust. Schrödinger, Einstein, később Bohm, Everett és mások más utakat kerestek. A „koppenhágai

értelmezés” elnevezés ráadásul sokszor olyan egységet sugall Bohr, Heisenberg és Born nézetei között, amely történetileg nem mindig létezett. Heisenberg időnként az összeomlásról és a megfigyelésről más hangsúllyal írt, mint Bohr; Bohr pedig kerülte azokat a megfogalmazásokat, amelyek szerint a hullámfüggvény egyszerűen a megfigyelő tudását írná le.

Brüsszelben a komplementaritás még friss program volt. Bohr a konferencia előtti hetekben dolgozott rajta, és a később megjelent Solvay-kötetbe bekerült tanulmánya sem pontosan azonos egy ott elhangzott előadással. E részlet azért fontos, mert a történeti emlékezet hajlamos kész doktrínákat visszavetíteni olyan pillanatokra, amikor a résztvevők még maguk is keresték a megfelelő nyelvet.

A komplementaritás hosszú életű fogalom lett. Bohr később a biológiától az emberi kultúráig próbálta kiterjeszteni analógiáit, bár ezek tudományos státusza más, mint a kvantummechanikához kapcsolódó eredeti gondolaté. A fizika történetében azonban 1927 egyik kulcsszava maradt. Nem egy kész válasz, inkább javaslat arra, hogyan lehet együtt élni azzal a ténnyel, hogy a mikroszkopikus természet nem igazodik a hétköznapi tárgyakra kialakított egyetlen képhez.

12. fejezet - Brüsszel, 1927. október 24.

Hétfőn, 1927. október 24-én Brüsszelben megnyílt az ötödik Solvay-fizikatanács. A résztvevők olyan pillanatban gyűltek össze, amikor az új kvantummechanika matematikai szerkezete szokatlan gyorsasággal állt össze. Heisenberg 1925-ös áttörése, Schrödinger 1926-os hullámegyenlete, Born valószínűségi értelmezése és Heisenberg 1927-es határozatlansági relációja alig két év alatt született. A konferencia ezért nem évtizedek óta érlelt elméletet értékelt, hanem szinte valós időben próbálta megérteni egy tudományos forradalom következményeit.

A tanácskozás hat napig tartott. A hivatalos program kevés nagy referátum köré szerveződött. William Lawrence Bragg a röntgensugarak kristályokról való visszaverődésével foglalkozott. Arthur Compton az elektromágneses sugárzás klasszikus elmélete és a kísérletek közötti eltéréseket tárgyalta. Louis de Broglie az új kvantumdinamikáról beszélt. Max Born és Werner Heisenberg a kvantummechanika formalizmusát ismertette. Erwin Schrödinger a hullámmechanikát mutatta be. A később kiadott jegyzőkönyvben Bohr

tanulmánya is szerepelt a kvantumposztulátumról és az atomelmélet fejlődéséről.

A névsor önmagában megmutatja, mennyire különböző irányok találkoztak. Compton kísérletei a fény részecskeszerű oldalát erősítették. De Broglie az anyag hullámjellegét hirdette. Born és Heisenberg absztrakt mechanikát épített, Schrödinger folytonos hullámképet keresett. Einstein kritikusan figyelte a valószínűségi fordulatot, Bohr pedig olyan fogalmi keretet alakított ki, amelyben a hullám és részecske klasszikus képei kiegészíthetik egymást.

A konferencia atmoszféráját könnyű utólag túldramatizálni. Nem úgy kell elképzelni, hogy Einstein és Bohr hat napon át egy pódiumon vitatkozott, a többiek pedig nézőként figyeltek. A hivatalos üléseken sokan hozzászóltak, és a tudományos eszmecserék egy része étkezések, séták és informális beszélgetések közben zajlott. A későbbi visszaemlékezésekből tudjuk, hogy Einstein újabb és újabb gondolkísérletekkel próbálta tesztelni az új elmélet korlátait, Bohr pedig válaszokat keresett. Ezek a jelenetek legendássá váltak, de részleteikben nem mindig rekonstruálhatók olyan pontossággal, ahogyan a népszerű elbeszélések sugallják.

A konferencia egyik fő kérdése a hullámfüggvény jelentése volt. Schrödinger számára a hullámmechanika kezdetben reményt kínált arra, hogy a kvantumugrásokat folytonos folyamatok váltsák fel. Born statisztikai értelmezése azonban más irányba vitte az elméletet. Heisenberg és Born már azt hangsúlyozták, hogy a kvantummechanika a megfigyelhető mennyiségek közötti kapcsolatokat adja, és alapvető értelemben statisztikai. Bohr ehhez kapcsolta a komplementaritást.

De Broglie előadása különösen érdekes az utókor számára. Vezetőhullám-elmélete olyan konkrét alternatívát kínált, amelyben a részecske és a hullám egyszerre kap szerepet. A program azonban nem vált főiránnyá. A konferencia után maga de Broglie is eltávolodott tőle. Évtizedekkel később David Bohm függetlenül kidolgozott változata újra megmutatta, hogy a determinisztikus kvantumelmélet lehetősége nem tűnt el végleg.

A brüsszeli hét politikai értelemben is egy különös békeidő pillanata volt. Európa még az első világháború következményeit hordozta, de a tudományos kapcsolatok részben helyreálltak. Német tudósok ismét jelen lehettek. Hat évvel később ez a közeg szétesett. 1927-ben azonban még egyetlen fényképen

szerepelhetett Einstein, Planck, Born, Schrödinger, Heisenberg és Bohr anélkül, hogy útlevelük, származásuk vagy államuk politikai rendszere végletesen meghatározta volna szakmai kapcsolatukat.

A konferencia elnöke, Lorentz különleges tekintélyével tartotta össze a vitákat. A korábbi fizika egyik utolsó nagy mestere olyan elmélet születését figyelte, amelynek matematikai nyelve már idegenebb volt saját nemzedékének. Jelenléte hidat alkotott Maxwell, az elektronelmélet és a relativitás kora, valamint a kvantummechanika új nemzedéke között. Halála néhány hónappal később szimbolikusan is lezárt egy korszakot.

A hét végén nem született olyan határozat, amely kihirdette volna a kvantummechanika végleges értelmezését. A Solvay-tanács nem akadémiai zsinat volt. Nem szavaztak arról, hogyan kell a természetet elképzelni. A konferencia jelentősége éppen abban áll, hogy egy időben, egy helyen láthatóvá tette a fizika nyitott lehetőségeit. A későbbi tankönyvek sok vitát kisimítottak, a történeti kutatás viszont újra megmutatta a változatosságot.

1927. október 24-én tehát nem egy kész világkép ünnepe kezdődött, hanem annak nyilvános próbája. A

résztvevők tudták, hogy valami nagy történt a fizikában. Azt azonban még nem tudhatták, milyen nyelven fogják száz év múlva elmesélni. A csoportkép ezért annyira erős: a szereplők már benne állnak a forradalomban, de még nem látják annak teljes történetét.

HÁTTÉRGYÁR

13. fejezet - Einstein kérdései, Bohr válaszai

Az Einstein-Bohr vita azért vált a huszadik századi fizika egyik alapmítoszává, mert ritkán találkozunk két ennyire eltérő szellemi alkat ugyanannak a problémának a legmélyén. Einstein világosságot, oksági szerkezetet és megfigyelőtől független valóságot keresett. Bohr abból indult ki, hogy az atomi jelenségek kényszerítenek bennünket a klasszikus fogalmak alkalmazási feltételeinek újragondolására. Nem abban különböztek, hogy egyikük hitt a kísérletekben, a másik pedig nem. Mindketten kivételesen szigorú fizikusok voltak. A vita arról szólt, milyen következtetést szabad levonni ugyanazokból a sikeres egyenletekből.

A brüsszeli találkozóhoz kapcsolódó visszaemlékezések szerint Einstein újabb és újabb gondolat-kísérletekkel próbálta sarokba szorítani a bizonytalansági relációt és a komplementaritást. A legismertebb történetek egy résekkel ellátott ernyőt, egy visszarúgó lemezt vagy egy foton pályáját meghatározni próbáló kísérletet említene. A részletek forrásonként eltérnek, ezért óvatosan kell bánni a jelenetek filmszerű rekonstrukciójával. Az viszont jól dokumentált, hogy

Einstein rendszeresen olyan mérési elrendezéseket javasolt, amelyekben szerinte egyszerre lehetne a kvantumelmélet által komplementernek tekintett információkat megszerezni.

Bohr válaszainak logikája visszatérő volt. Ha Einstein egy mérőeszköz mozgását is figyelembe vette, Bohr megmutatta, hogy éppen ez a szabadságfok teszi lehetetlenné a másik mennyiség tetszőlegesen pontos meghatározását. Ha a részecske útvjáról akarunk információt, olyan kölcsönhatást kell engednünk, amely megszünteti vagy elhomályosítja az interferencia feltételeit. A mérési elrendezés nem semleges ablak, amelyen keresztül ugyanazt a kész mikroszkopikus valóságot nézzük. Meghatározza, milyen jelenséget tudunk egyáltalán definiálni.

A vita 1930-ban, a következő Solvay-konferencián új szintre lépett. Einstein híres fotondoboz-gondolatkísérletében egy sugárzást tartalmazó dobozból rövid időre kinyíló zár segítségével egyetlen foton távozzhat. A doboz tömegének megméréséből elvileg meghatározható a foton energiája, az óra pedig a kilépés időpontját adja. Einstein úgy vélte, ez megkerülheti az energia és idő közötti bizonytalansági kapcsolatot. Bohr végül Einstein saját általános

relativitáselméletét használta fel válaszában: a doboz mérlegelése és a gravitációs időeltolódás összekapcsolása visszaállította a megfelelő korlátot.

Az epizódot sokszor Bohr győzelmeként mesélik. Történetileg pontosabb úgy fogalmazni, hogy Einstein konkrét kísérletei nem döntötték meg a kvantummechanika konzisztenciáját. Ebből azonban nem következik, hogy Einstein minden filozófiai aggálya értelmét veszítette. A következő években kritikája átalakult. Már nem azt próbálta bizonyítani, hogy a kvantummechanika belsőleg ellentmondásos, hanem azt, hogy nem teljes leírása a fizikai valóságnak.

Ennek csúcspontja az 1935-ben Boris Podolskyval és Nathan Rosennel közösen publikált EPR-tanulmány lett. A gondolatkísérlet két egymással korrelált rendszerből indult ki. Ha az egyik részecskén végzett mérés alapján a távoli másik részecske valamely tulajdonságát biztosan megjósolhatjuk anélkül, hogy közvetlenül zavarnánk, akkor Einsteinék szerint annak a tulajdonságnak a valóság elemének kell lennie. A kvantummechanika viszont nem rendel egyszerre meghatározott értéket minden ilyen mennyiséghez. Ebből azt a következtetést vonták le, hogy az elmélet nem teljes.

Bohr válasza az EPR-cikkre nehéz és sokat elemzett szöveg. Nem fogadta el Einstein realitási kritériumát, és ismét a mérési feltételek egészének jelentőségét hangsúlyozta. Kettejük vitája ezzel már messze túllépett az 1927-es konkrét gondolat kísérleteken. A kérdés az lett, hogy a fizikai valóság tulajdonságai előre léteznek-e a mérestől függetlenül, valamint hogy a térben távoli rendszerek mennyire tekinthetők egymástól függetlennek.

Einstein számára a lokalitás különösen fontos volt. A relativitáselmélet szerint nincs olyan fizikai hatás, amely a félynél gyorsabban terjedne. Ha két rendszer messze kerül egymástól, nehéz elfogadni, hogy az egyikén végzett mérés azonnal megváltoztatja a másik valós fizikai állapotát. Einstein később gúnyosan „kísérteties távolhatásként” beszélt az ilyen jellegű összefüggésről. Évtizedekkel később John Bell éppen ezt a dilemmát alakította kísérletileg ellenőrizhető kérdéssé.

Bohr és Einstein személyes viszonyát félrevezető volna ellenséges párbajként ábrázolni. Mélyen tisztelték egymást. Bohr egész életében Einstein arcképét tartotta dolgozószobájában, és Einstein kritikája állandó ösztönzést jelentett számára. A vita nem sértette meg a tudományos kapcsolatot; inkább példája annak, hogyan

képes két ember évtizedeken át alapvető kérdésekben nem egyetérteni úgy, hogy közben a másik intellektuális jelentőségét elismeri.

A mai fizika szempontjából különösen érdekes, hogy Einstein kérdései nem haltak el. A kvantummechanika gyakorlati sikere nem szüntette meg az alapok vizsgálatát. Bell tétele, az összefonódási kísérletek, a kvantumkriptográfia és a kvantumszámítógép mind olyan fogalmakat használnak, amelyek kapcsolatban állnak azzal, amit Einstein problematikusnak érzett. A történet ezért nem írható le úgy, hogy Bohrnak egyszerűen igaza lett, Einstein pedig tévedett. Bohr értelmezési programja hosszú időre uralkodóvá vált, Einstein kritikája pedig olyan kérdéseket hagyott örökül, amelyek később új tudományos területeket nyitottak.

14. fejezet - A konferencia öt nagy beszámolója

Az ötödik Solvay-tanács különlegességét jól érzékelteti, hogy a hatnapos rendezvényen mindössze néhány nagy beszámoló adta a formális gerincet. A szervezők nem akarták előadások tucatjaival betölteni az időt. A hangsúly a vitán volt. A hivatalos jegyzőkönyvben William Lawrence Bragg, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born és Werner Heisenberg közös beszámolója, valamint Erwin Schrödinger tanulmánya alkotta a fő anyagot. Bohr szövege is bekerült a kötetbe, de a történeti források szerint ezt utólag dolgozta ki a publikáció számára.

Bragg témája első látásra kevésbé filozofikus: a röntgensugarak kristályokon való visszaverődésének intenzitása. Mégis alapvető jelentőségű volt. A röntgendiffrakció néhány évvel korábban megmutatta, hogy kristályok atomi szerkezete meghatározható a hullámok interferenciájából. Bragg és apja 1915-ben Nobel-díjat kaptak ezért a munkáért. Az új kvantummechanika korában azonban a röntgensugárzás maga is kettős arcot mutatott: hullámként diffraktált, miközben Compton kísérleteiben részecskeszerűen

ütközött elektronokkal.

Arthur Compton 1923 körül végzett kísérletei döntő bizonyítékot szolgáltatottak a foton impulzusára. Röntgensugárzást szóratott elektronokon, és azt tapasztalta, hogy a szórt sugárzás hullámhossza megváltozik a szórési szög függvényében. A jelenség egyszerűen leírható úgy, mintha egy foton ütközne egy elektronnal, és energiát, valamint impulzust adna át neki. Compton 1927-ben Nobel-díjat kapott ezért a felfedezésért. A Solvay-konferencián tehát olyan ember beszélt a klasszikus elektromágneses elmélet problémáiról, akinek kísérlete közvetlenül hozzájárult a fény részecskeképének elfogadásához.

De Broglie beszámolója a másik irányú mozgást képviselte. Ha a fény, amelyet hullámnak hittünk, részecskeként is viselkedik, akkor az elektron, amelyet részecskének hittünk, hullámszerű lehet. De Broglie azonban ennél tovább ment, és vezetőhullám-modellt javasolt. Az elektron konkrét pozícióval rendelkezik, miközben egy hullám szabja meg mozgását. Ezt a programot a konferencián komoly kritika érte, de az utókor szempontjából fontos, hogy valódi alternatíva volt az éppen kialakuló statisztikai ortodoxiával szemben.

Born és Heisenberg előadása sokkal magabiztosabb hangot ütött meg. Az új kvantummechanika matematikai szerkezete addigra számos problémát megoldott. A két fizikus úgy látta, hogy az alapvető formalizmus lényegében kész, és a további munka inkább alkalmazások, közelítések és részletek kidolgozását jelenti. Ez az önbizalom részben indokolt volt. A kvantummechanika a következő években valóban rendkívüli sikerrel írta le az atomfizikát és a kémiai kötések. Ugyanakkor a jelentéséről szóló viták korántsem zárultak le.

Schrödinger hullámmechanikai beszámolója a folytonosabb képet képviselte. Az ő formalizmusa sokak számára intuitívabb volt, különösen azért, mert differenciálegyenletekhez és hullámjelenségekhez kapcsolódott. Ám a hullámfüggvény jelentése itt is problémát okozott. Ha a hullám valóságos, mi hullámozik? Ha csak valószínűségi amplitúdó, hogyan lesz belőle egyetlen mérési eredmény? A konferencia nem adott végleges választ.

A beszámolók sora önmagában cáfolja azt a későbbi képet, hogy 1927-ben kizárólag Einstein és Bohr nézete állt egymással szemben. Bragg és Compton a kísérleti oldal problémáit hozta be. De Broglie saját ontológiai

modellt képviselt. Born és Heisenberg formalista-statisztikai irányt vitt. Schrödinger más intuícióval közelített. Bohr komplementaritása pedig olyan fogalmi program volt, amely még formálódott.

A konferencia történeti jelentősége így részben az alternatívák sokféleségében rejlik. A későbbi tankönyvi fejlődés szükségképpen egyszerűsít: az oktatásban világos szabályok és használható algoritmusok kellenek. A tudomány születésének pillanatában azonban a fogalmak sokkal kevésbé rendezettek. A Solvay-jegyzőkönyv azért különösen értékes forrás, mert megőrzi ezt a rendezetlenséget. Látható belőle, hogy a kvantummechanika nem egyetlen ember fejéből pattant elő kész formában, hanem egymást keresztező kutatási programokból alakult.

Ez a sokféleség a fénykép arcain is olvasható. A huszonkilenc résztvevő nem huszonkilenc változata ugyanannak a nézetnek. Az idősebbek közül többen óvatosak voltak az új értelmezésekkel szemben, a fiatalabbak között pedig szintén jelentős különbségek voltak. A modern fizika egyik legnagyobb fordulata tehát nem konszenzussal kezdődött, hanem produktív nézeteltéréssel.

15. fejezet - A „koppenhágai győzelem” mítosza

A tudománytörténet szereti a világos fordulópontokat. Könnyebb úgy mesélni, hogy 1927-ben Brüsszelben a koppenhágai értelmezés győzött, Einstein pedig elveszítette a vitát. A történet dramaturgiailag tökéletes: két zseni, két világkép, egy döntő konferencia. A modern történeti kutatás azonban arra figyelmeztet, hogy ez a kép túl egyszerű.

A „koppenhágai értelmezés” maga sem volt 1927-ben olyan egységes doktrína, mint később a tankönyvek sugallták. Bohr komplementaritása, Heisenberg megfigyelhetőségi és bizonytalansági hangsúlyai, Born statisztikai értelmezése és Pauli gyakorlati álláspontja nem teljesen fedték egymást. A későbbi generációk sok különbséget egyetlen címke alá rendeztek. A címke hasznos, ha nagy vonalakban akarjuk jelezni a kvantummechanika ortodox értelmezési hagyományát, de történetileg könnyen elrejtí a belső eltéréseket.

Az sem állítható, hogy a Solvay-konferencia után minden jelentős fizikus elfogadta volna Bohr álláspontját. Einstein továbbra is kritikus maradt. Schrödinger sem békélt meg a mérés központi szerepével. De Broglie egy

időre ugyan háttérbe helyezte saját pilotahullám-programját, de az alternatív értelmezés lehetősége nem szűnt meg. A kvantummechanika alapjainak kérdése az 1930-as években is aktív maradt.

A „győzelem” inkább gyakorlati és intézményi értelemben értelmezhető. A kvantummechanika formalizmusa rendkívül sikeres volt, a koppenhágai kör pedig erős nemzetközi hálózatot alkotott. A fiatal fizikusok számára az új elmélet hatalmas kutatási programot nyitott: atomszerkezet, molekulák, szilárdtestfizika, magfizika, sugárzáselmélet. Sok kutató számára kevésbé volt sürgős a filozófiai kérdés, ha a számítások működtek. A „shut up and calculate” későbbi szlogenje ugyan nem Bohr mondata, de jól kifejezi azt a munkakultúrát, amelyben az alapok vitája háttérbe szorulhatott a sikeres alkalmazások mögött.

A második világháború és az azt követő nagy tudományos projektek tovább erősítették ezt a tendenciát. Az atomfizika és a részecskefizika gyors fejlődése, az amerikai egyetemek és laboratóriumok növekedése, majd a hidegháborús kutatás olyan generációkat képzett, amelyek számára a kvantummechanika elsősorban hatékony eszköz volt. Az értelmezési problémákat sok helyen filozófiának

tekintették, amely nem akadályozza a számítási eredményeket.

A történet az 1950-es évektől újra kinyílt. David Bohm megmutatta, hogy lehetséges a kvantummechanika determinisztikus rejtett változós megfogalmazása. Hugh Everett olyan értelmezést javasolt, amelyben a hullámfüggvény soha nem omlik össze. John Bell 1964-ben tételt alkotott arról, milyen kísérleti korlátai vannak a lokális rejtett változós elméleteknek. Ettől kezdve az Einstein-Bohr vita egy része filozófiai kérdésből laboratóriumban tesztelhető összefüggések problémájává vált.

A későbbi Bell-kísérletek a kvantummechanika által jósolt korrelációkat erősítették meg, és kizárták a lokális rejtett változós elméletek széles osztályát. Ez fontos győzelem volt a kvantumelmélet számára, de még ez sem választott ki egyetlen értelmezést. A Bohm-mechanika például nem lokális, ezért nem cáfolja Bell eredménye. A sokvilág-értelmezés másképpen kerüli meg a problémát. A mérési kérdés és a hullámfüggvény ontológiai státusza ma is vita tárgya.

Ezért pontosabb úgy tekinteni 1927-re, mint egy fordulópontra, nem pedig egy lezárt tárgyalásra. A

kvantummechanika új formalizmusa akkorra meggyőzően győzött a régi kvantumelmélettel szemben. Azt viszont, hogy a formalizmus mit mond a valóságról, nem döntötték el egyszer s mindenkorra. Bohr programja hosszú időre meghatározta a beszédmódot, Einstein kritikája pedig kisebbségben maradt, de nem vált terméketlenné.

A mítosz lebontása nem csökkenti a Solvay-konferencia jelentőségét. Éppen ellenkezőleg. Ha nem döntő csataként, hanem intellektuális kereszteződésként nézzük, még érdekesebb. A konferencián olyan utak is megjelentek, amelyek később eltűntek, majd újra előkerültek. A tudomány fejlődése nem mindig egyenes vonal. Bizonyos kérdések évtizedekre elcsendesedhetnek, majd új kísérleti vagy technológiai lehetőségek hatására ismét központiá válhatnak.

A fénykép ezért nem egy győzelmi tabló. Inkább az elágazások képe. A szereplők közül senki sem látta előre Bell tételét, a kvantumteleportációt vagy a szupravezető kvantumbiteket. Mégis azok a fogalmi feszültségek, amelyeket 1927-ben vitattak, közvetlenül vezetnek ezekhez a későbbi fejleményekhez.

16. fejezet - Huszonkilenc ember, tizenhét Nobel-díj

Az 1927-es Solvay-fénykép egyik legtöbbet idézett adata, hogy a huszonkilenc résztvevő közül tizenheten Nobel-díjat kaptak. A szám önmagában lenyűgöző, de könnyen eltereli a figyelmet arról, hogy a csoport jelentősége nem csak a díjakban mérhető. A Nobel-díj mindig utólagos elismerés, és nem feltétlenül fedí le egy korszak valamennyi fontos szereplőjét. A kép ereje inkább abból fakad, hogy a modern fizika több egymást követő nemzedéke van rajta egyszerre jelen.

Az első sor közepén Hendrik Lorentz ül. Munkája az elektronelméletben és az elektromágnességben megteremtette azt a matematikai hátteret, amelyből a relativitáselmélet kinőtt. Einstein különösen nagyra becsülte. Lorentz a konferencia elnökeként nem egy új kvantumprogram vezetője, hanem a régi és új fizika közötti közvetítő tekintély.

Mellette Einstein és Marie Curie olyan nevek, amelyek már 1927-ben a nagyközönség számára is ismertek voltak. Curie kétszeres Nobel-díjas, a radioaktivitás kutatásának úttörője. Tudományos tekintélye mellett jelenléte a nők korabeli tudományos helyzetére is

rámutat: huszonkilenc résztvevő között ő az egyetlen nő. Ez nem a női tehetség hiányát tükrözte, hanem azt az intézményi világot, amelyben az egyetemi állásokhoz és kutatói karrierekhez vezető út a nők számára jóval szűkebb volt.

Max Planck a kvantumelmélet kezdete, Niels Bohr a régi kvantumelmélet és az új értelmezés központi alakja, Max Born a matematikai és statisztikai fordulat egyik szerzője. Heisenberg, Schrödinger és Dirac már a következő generáció. A kép különlegessége, hogy az alapítók és azok a fiatalok, akik néhány év alatt újraalkották a fizikát, fizikailag is egy keretbe kerülnek.

Paul Dirac különösen feltűnő példa. 1927-ben huszonöt éves, visszahúzódó cambridge-i fizikus, akiről kollégái már tudják, hogy rendkívüli matematikai tehetség. Egy évvel később megalkotja az elektron relativisztikus kvantumelméletét, amelyből az antianyag lehetősége következik. A pozitron 1932-es felfedezése látványosan igazolja a jóslatot. Dirac 1933-ban Schrödingerrel megosztva Nobel-díjat kap.

Wolfgang Pauli szintén huszonéves, de már legendásan éles kritikusként ismert. Kizárási elve 1925-ben alapvető magyarázatot adott az elektronehéjak

szerkezetére és a periódusos rendszer mélyebb rendjére. A „Pauli-hatásról” szóló tréfák szerint pusztán jelenléte is elég volt ahhoz, hogy laboratóriumi berendezések elromoljanak, de valódi hatása elsősorban abban állt, hogy kíméletlen pontossággal szűrte kollégái elméleti ötleteit.

Arthur Compton a fény részecsketermészetének kísérleti bizonyítékát hozta, C. T. R. Wilson ködkamrája láthatóvá tette töltött részecskék pályáit, Irving Langmuir az ipari fizikai kémia jelentős alakja volt. Peter Debye molekulafizikai és szilárdtestfizikai munkája, Owen Richardson termoelektron-emissziós kutatása, William Lawrence Bragg röntgenkrisztallográfiája mind azt mutatják, hogy a konferencia nem kizárólag elméleti filozófusok klubja volt. Erős kísérleti és alkalmazott fizikai háttér állt az értelmezési viták mögött.

Auguste Piccard neve a későbbi nagyközönség számára inkább magaslégköri ballonrepülései és mélytengeri kutatásai miatt ismert. Paul Ehrenfest kiváló elméleti fizikus és tanár volt, aki Leidenben Lorentz örökét vitte tovább, és személyes kapcsolatain keresztül az európai fizika egyik fontos összekötője lett. Tragikus halála 1933-ban különösen megrázta barátait. Léon Brillouin, Ralph Fowler, Hendrik Kramers és mások

szintén olyan tudományos hálózat részei voltak, amely nélkül a kvantummechanika gyors terjedése elképzelhetetlen.

A tizenhét Nobel-díj látványos statisztika, de a csoportkép igazi jelentése nem a díjak összege. A modern tudomány kollektív természetét mutatja. A nagy elméletekhez szükség van matematikusokra, kísérletezőkre, intézetigazgatókra, kritikusokra, tanárookra és olyan személyekre is, akik talán nem alkotnak egyetlen közismert törvényt, de nélkülük a kutatói közösség nem működne.

A fénykép egyben emlékeztet arra, mennyire sűrű volt a korszak személyes hálózata. A résztvevők egymás tanítványai, mesterei, vitapartnerei és levelezőtársai voltak. Egy új eredmény nem magányos kéziratként létezett, hanem hetek alatt eljutott Koppenhágából Göttingenbe, Berlinből Cambridge-be, Zürichből Brüsszelbe. A kvantumforradalom gyorsaságát részben ez a hálózat magyarázza.

17. fejezet - Dirac és az antianyag

Paul Adrien Maurice Dirac 1927-ben a konferencia egyik legfiatalabb résztvevője volt. Visszahúzódó természetéről már életében legendák születtek. Kollégái tréfásan a beszéd minimális egységét is „egy diracban” mérték. A karikatúra azonban könnyen elfedi gondolkodásának különleges eleganciáját. Dirac számára a jó fizikai elméletnek nemcsak igaznak, hanem matematikailag szépnek is kellett lennie.

Amikor Heisenberg új kvantummechanikája 1925-ben eljutott Cambridge-be, Dirac gyorsan felismerte a benne rejlő algebrai szerkezetet. Függetlenül olyan formalizmust dolgozott ki, amely a klasszikus mechanika Poisson-zárójelei és a kvantumkommutátorok közötti kapcsolatot használta. Munkája hozzájárult ahhoz, hogy a kvantummechanika ne különálló számítási receptek gyűjteménye, hanem egységes matematikai elmélet legyen.

A következő probléma a relativitás volt. Schrödinger egyenlete jól működött alacsony sebességeknél, de nem illett össze közvetlenül Einstein speciális relativitáselméletével. Dirac olyan egyenletet keresett az

elektronra, amely egyszerre kvantumos és relativisztikus. 1928-ban publikált eredménye váratlanul magába foglalta az elektron spinjét és mágneses tulajdonságait is.

Az egyenlet azonban furcsa negatív energiájú megoldásokat tartalmazott. Dirac először megpróbálta ezeket az elektronokkal és protonokkal kapcsolatba hozni, végül arra jutott, hogy az elektronnak léteznie kell egy azonos tömegű, de ellentétes töltésű párjának. 1932-ben Carl Anderson kozmikus sugárzás vizsgálata közben felfedezte a pozitront. Az antianyag, amely néhány évvel korábban matematikai zavaró tényezőnek tűnt, fizikai valósággá vált.

Ez az epizód a huszadik századi elméleti fizika egyik legszebb példája arra, hogy a matematika előre jelezhet addig ismeretlen természeti jelenséget. A kvantummechanika 1927-ben még főleg atomok és sugárzás leírásának tűnt. Dirac munkája már a kvantumtérelmélet felé nyitott utat, ahol részecskék keletkezhetnek és eltűnhetnek, az anyag és sugárzás pedig ugyanazon elméleti keretben kezelhető.

Dirac gondolkodása bizonyos értelemben távol állt Bohr hosszú fogalmi fejtegetéseitől. Kevésbé érdekelte a

mérés filozófiai nyelve; számára a matematikai formalizmus belső következetessége és szépsége erős iránytű volt. Ez nem jelenti, hogy filozófiai kérdések közömbösek lettek volna számára, de munkamódszere jól példázza a kvantumforradalom másik útját: az absztrakt matematika gyakran megelőzhette az intuitív megértést.

A későbbi részecskefizika nagyrészt ezen az úton haladt. A kvantumelektrodinamika, majd a standard modell olyan matematikai struktúrákra épült, amelyek hétköznapi képekkel alig jeleníthetők meg. Az elméletek mégis példátlan pontossággal jósoltak. Dirac öröksége ezért nemcsak az antianyag, hanem egy tudományos stílus is: bízz a megfelelő matematikai szerkezetben akkor is, ha a természetképed még nem tud vele lépést tartani.

Az antianyag később a populáris kultúrában egzotikus energiaforrásként vagy pusztító anyagként jelent meg. A valós fizikában előállítása rendkívül energiaigényes, és csak kis mennyiségekkel dolgozunk. Pozitronokat ugyanakkor rutinszerűen használnak az orvosi képalkotásban, például a PET-vizsgálatokban. A száz évvel ezelőtti elméleti egyenlet egyik furcsa következménye így kórházi diagnosztikai technológiává is vált.

Dirac sorsa politikailag kevésbé drámai, mint sok német vagy közép-európai kollégájáé. Cambridge-ben maradt, később az Egyesült Államokban dolgozott. 1933-ban Schrödingerrel együtt kapott Nobel-díjat. A két ember szinte ellentétes személyiség volt, mégis ugyanannak az elméleti forradalomnak két kulcsfigurája.

A Solvay-fényképen Dirac még a nagy áttörés előtti pillanatban ül. Ez a kép utólagos varázsának egyik forrása. A már befutott tudósok mellett olyan fiatalokat is látunk rajta, akiknek legnagyobb eredménye még előttük állt. A kamera 1927 októberében olyan jövőt rögzített, amelyet még maga a szereplő sem ismert.

18. fejezet - 1933: amikor a politika belépett a laboratóriumba

A Solvay-fénykép 1927-es Európája mindössze hat évig maradt fenn. 1933. január 30-án Adolf Hitlert Németország kancellárjává nevezték ki. Néhány hónap alatt felszámolták a demokratikus intézményrendszer lényegét, és megkezdődött a zsidónak minősített, illetve politikailag megbízhatatlannak tekintett közalkalmazottak eltávolítása. A német egyetemek és kutatóintézetek azonnal érezték a következményeket.

Albert Einstein éppen külföldön tartózkodott, amikor Hitler hatalomra került. Tudta, hogy nem térhet vissza biztonságosan. Lemondott porosz akadémiai tagságáról, vagyonát részben lefoglalták, és végül az Egyesült Államokban, Princetonban telepedett le. A világ legismertebb német tudósa néhány hónap alatt emigráns lett.

Max Born helyzete még közvetlenebbül mutatja az egyetemi tisztogatás működését. Zsidó származása miatt elveszítette göttingeni professzori állását. Az a város, amely az 1920-as években a matematika és az elméleti fizika egyik világközpontja volt, rövid idő alatt szellemi

veszteséget szenvedett. Born Cambridge-be, majd Edinburgh-ba került. Göttingenből számos más tudós is távozott.

Erwin Schrödinger nem volt zsidó, de politikailag és erkölcsileg nem tudott azonosulni a náci rendszerrel. 1933-ban elhagyta berlini állását és Oxfordba ment. Később Ausztriába tért vissza, de az Anschluss után ismét veszélybe került. Végül Írországra talált hosszabb távú otthont. Pályája jól mutatja, hogy a tudományos emigráció nem mindig egyetlen országváltás volt; sokan évekig bizonytalan állások és ideiglenes menedékek között mozogtak.

Niels Bohr Dániában maradt, és intézete egy ideig menedéket, átmeneti állást és kapcsolati hálót biztosított menekülő kollégáknak. Dánia 1940-es német megszállása után helyzete fokozatosan veszélyessé vált. 1943-ban, amikor a dán zsidóság deportálása fenyegetett, Bohr maga is menekülni kényszerült. Svédországon keresztül jutott Nagy-Britanniába, majd kapcsolatba került a szövetséges atomfegyver-programmal.

Heisenberg ezzel szemben Németországban maradt. Döntése később az egyik legtöbbet vitatott tudósi magatartássá vált. A náci ideológia bizonyos képviselői a

modern elméleti fizikát „zsidó fizikának” bélyegezték, és Heisenberget is támadták Einstein elméleteinek tanítása miatt. Végül megőrizhette pozícióját, és a háború alatt a német uránprogram egyik vezető fizikusa lett. Hogy mennyire akart, illetve mennyire tudott volna atomfegyvert építeni, évtizedeken át vita tárgya maradt.

Planck Németországban maradt, és idős tekintélyként próbált egyensúlyozni az intézményi túlélés és az erkölcsi határok között. Személyes tragédiája a háború végén tetőzött, amikor fia, Erwin Planck a Hitler elleni összeesküvéshez való kapcsolódása miatt kivégzés áldozata lett. A kvantumelmélet alapítója így saját családján keresztül is megtapasztalta a diktatúra brutalitását.

Pauli osztrák származása és családi háttere miatt a háború éveiben bizonytalan jogi helyzetbe került. Végül az Egyesült Államokba ment, Princetonban dolgozott, majd a háború után visszatért Zürichbe. De Broglie Franciaországban maradt. Curie 1934-ben meghalt, így a náci korszak következő szakaszát már nem élte meg. Ehrenfest 1933-ban, súlyos lelki válság közepette öngyilkosságot követett el.

A fényképen látható közösség szétszóródása nem csak egyéni dráma volt. A világ tudományos térképe is átalakult. Az Egyesült Államok óriási szellemi tőkét nyert az európai emigrációból. Princeton, Berkeley, Chicago, Los Alamos és más központok olyan kutatókat fogadtak be, akik néhány évvel korábban Berlinben, Göttingenben, Bécsben, Rómában vagy Budapesten dolgoztak. A huszadik század második felének amerikai tudományos fölénye részben ebből a kényszerű európai kivándorlásból nőtt ki.

1933 ezért a kvantumforradalom történetében is választóvonal. Az 1920-as években a tudósok főleg elméleteken vitatkoztak; az 1930-as évek végétől egyre többük munkáját a geopolitika és a háború határozta meg. A kvantummechanika eközben nem maradt a filozófiai szalonok témája. Az atommag kutatása rövidesen olyan gyakorlati következményekhez vezetett, amelyeknél a fizikusoknak már nemcsak az elmélet jelentéséről, hanem saját felelősségükről is döntenük kellett.

19. fejezet - Az atommag és a fegyver árnyéka

A kvantummechanika 1927-ben elsősorban az atom elektronburkának és a sugárzásnak az új elmélete volt. Az atommag szerkezete még sok tekintetben homályos maradt. Rutherford már korábban kimutatta a mag létezését, a proton fogalma is kialakult, de a neutron felfedezésére 1932-ig kellett várni. James Chadwick eredménye hirtelen érthetőbbé tette az atommag tömegét és megnyitotta az utat a magreakciók új korszakához.

A neutron különösen alkalmas lövedéknek bizonyult, mert elektromosan semleges. Nem taszítja az atommag pozitív töltése, így könnyebben behatolhat a magba. Enrico Fermi és munkatársai Rómában neutronbesugárzással új magreakciókat vizsgáltak. 1938 végén Otto Hahn és Fritz Strassmann Berlinben olyan eredményeket kaptak urán neutronbesugárzásakor, amelyeket Lise Meitner és unokaöccse, Otto Frisch atommaghasadásként értelmeztek. A mag két nagyobb darabra hasad, miközben hatalmas energia és további neutronok szabadulhatnak fel.

Az energia nagysága Einstein tömeg-energia összefüggésével volt érthető, a magfolyamatok részletes leírása pedig a kvantumfizika eszközeit igényelte. A láncreakció lehetősége szinte azonnal felmerült. Ha egy hasadás több neutron termel, és ezek újabb hasadásokat idéznek elő, a folyamat önfenntartóvá válhat. Ellenőrzött formában reaktor, gyorsan felfutó formában fegyver készíthető belőle.

A náci Németország terjeszkedése miatt az elméleti lehetőség politikai fenyegetéssé vált. Szilárd Leó és más emigráns fizikusok attól tartottak, hogy Németország atomfegyvert fejleszthet. 1939-ben Einstein aláírta azt a Rooseveltnél elnöknek szóló levelet, amely felhívta a figyelmet az uránhasadás katonai lehetőségeire. Einstein később közvetlenül nem dolgozott a Manhattan-terven, és biztonsági okokból nem is vonták be. Neve mégis összekapcsolódott az atomkorszak kezdetével.

Az Egyesült Államok hatalmas ipari és tudományos vállalkozása, a Manhattan-terv 1942-től gyorsult fel. Oak Ridge-ben uránt dúsítottak, Hanfordban plutóniumot termeltek, Los Alamosban pedig J. Robert Oppenheimer vezetésével a bombák tervezése zajlott. A projektben számos európai emigráns dolgozott: Fermi, Bethe, Teller, Wigner, Szilárd és mások. Bohr is kapcsolatba került a

programmal, bár elsősorban tanácsadói és politikai gondolkodói szerepet játszott.

Heisenberg közben a német uránprogramban dolgozott. A háború után a szövetségesek elfogták őt és több német atomtudóst, majd az angliai Farm Hallban lehallgatták beszélgetéseiket. A felvételek értelmezése máig vita tárgya, de az világos, hogy Németország nem jutott közel működő atombombához. A kudarc okai között szervezeti, ipari, stratégiai és tudományos tényezők egyaránt szerepeltek. Nem szükséges romantikus történetet gyártani arról, hogy Heisenberg szándékosan sabotálta volna a bombát; erre nincs meggyőző bizonyíték.

1945. július 16-án Új-Mexikóban felrobbant az első kísérleti atomfegyver. Augusztusban Hirosimára és Nagaszakira atombombát dobtak. A kvantumfizika ezzel olyan történelmi következményhez kapcsolódott, amelyet 1927-ben a Solvay-konferencia résztvevői aligha láthattak előre. Pontosabban fogalmazva: az atombomba létrejöttét nem egyetlen elmélet magyarázza. A fegyverhez magfizikai felfedezések, mérnöki teljesítmény, állami döntés, háborús ipar és politikai stratégia együtt kellett. Az elméleti fizika nélkül viszont a folyamat megértése és irányítása elképzelhetetlen lett

volna.

A háború után a tudósok felelősségének kérdése a közélet központi témájává vált. Bohr már a háború alatt a nukleáris titkok nemzetközi ellenőrzésének szükségességéről beszélt. Einstein békepárti és atomfegyver-ellenes kampányokban vett részt, bár saját korábbi levelének szerepét gyakran túlbecsülik. Oppenheimer későbbi sorsa az amerikai hidegháborús politika egyik szimbolikus történetévé vált.

A kvantumforradalom tehát erkölcsi forradalmat nem hozott automatikusan. Az egyenletek nem mondják meg, mire használjuk őket. A tudomány képességeket teremt, a politikai közösségek pedig döntenek alkalmazásukról. A Solvay-fénykép nyugodt arcai mögött utólag már ott látjuk a huszadik század kettősségét: ugyanaz a tudás vezethet orvosi diagnosztikához, energiatermeléshez, elektronikai forradalomhoz és tömegpusztító fegyverhez.

20. fejezet - A tranzisztor: amikor a kvantummechanika beköltözött a hétköznapiakba

A kvantummechanika történetét könnyű úgy elmesélni, mintha különös gondolkísérletek és filozófiai viták tudománya volna. A huszadik század második felében azonban az elmélet szó szerint beköltözött milliárdnyi hétköznapi tárgyba. A döntő lépést a félvezetők fizikájának megértése és a tranzisztor feltalálása jelentette.

A szilárd anyagok elektromos tulajdonságai klasszikus modellekkel csak korlátozottan voltak érthetők. A kvantummechanika megmutatta, hogy kristályban az elektronok megengedett és tiltott energiatartományokba rendeződnek. A vezetőkben, szigetelőkben és félvezetőkben az energiasávok eltérő szerkezete határozza meg az elektromos viselkedést. A félvezető különlegessége, hogy vezetőképessége szennyezéssel, hőmérséklettel és elektromos térrel érzékenyen szabályozható.

A Bell Laboratories kutatói a második világháború után olyan szilárdtest-erősítőt kerestek, amely kiválthatja a vákuumcsöveket. John Bardeen és Walter Brattain

1947 decemberében működő pontkontakt tranzisztort készített, William Shockley pedig rövidesen kidolgozta az átmeneti tranzisztor elméletét és konstrukcióját. 1956-ban hárman megosztva kapták meg a fizikai Nobel-díjat a félvezetők kutatásáért és a tranzisztorhatás felfedezéséért.

A tranzisztor jelentőségét nehéz túlbecsülni. Kicsi, megbízható, kevés energiát fogyaszt és gyorsan kapcsolható. Egyetlen alkatrészből hamarosan integrált áramkörök, majd mikroprocesszorok milliárdnyi tranzisztorból álló rendszerei lettek. Telefon, számítógép, műhold, autóelektronika, orvosi műszer, internetes szerver: a modern technológiai környezet szinte minden rétegében ott van.

A kapcsolat az 1927-es vitákkal közvetlenebb, mint elsőre látszik. A félvezetők működésének megértéséhez szükség van az elektronok hullámtermészetére, Pauli kizárási elvére, a Fermi-Dirac statisztikára, a kvantumos energiasávokra és az alagúthatásra. A Solvay-konferencia résztvevői ugyan nem tranzisztort akartak építeni, de az általuk létrehozott elmélet tette lehetővé annak tudatos tervezését.

Ez a történet fontos tanulság a tudomány finanszírozásáról is. A legmélyebb alapkutatás gyakorlati haszna gyakran évtizedekkel később jelenik meg, és előre nem jósolható pontosan. Amikor Heisenberg mátrixokat írt, Schrödinger hullámegyenletet keresett vagy Pauli a kizárási szabályt fogalmazta meg, senki sem készített üzleti tervet személyi számítógépre. A huszadik század egyik legnagyobb ipari átalakulása mégis közvetlenül ezekre az elméletekre épült.

A kvantummechanika a tranzisztorttal elvesztette egzotikus távolságát. Nem kellett laboratóriumban egyetlen elektront figyelni ahhoz, hogy hatását tapasztaljuk. A rádió egyre kisebb lett, majd a számítógép egy egész szobából íróasztalra, végül zsebbe költözött. Az információ feldolgozása olcsóbbá és gyorsabbá vált, ami gazdasági és társadalmi rendszereket alakított át.

A mikrochip története további kvantumos jelenségekre épült. A félvezetőipar méretcsökkentése során az eszközök olyan tartományba jutottak, ahol az alagúthatás és más kvantumhatások mérnöki korlátokká és lehetőségekké váltak. A huszadik század végére a kvantummechanika a chip működésének alapját és a további miniatürizálás több határfeltételét is

meghatározta.

Einstein valószínűleg meglepődött volna azon, hogy az általa filozófiailag hiányosnak tartott elmélet milyen technológiai civilizációt hoz létre. A siker azonban nem oldotta meg kifogásait. Egy elmélet rendkívül pontos és hasznos lehet akkor is, ha értelmezéséről nincs teljes egyetértés. A tranzisztor ennek talán legjobb jelképe: működéséhez nem kell eldöntenünk, milyen ontológiai státuszt tulajdonítsunk a hullámfüggvénynek, de nélküle nem tudnánk megfelelően kiszámítani az anyag elektronikus tulajdonságait.

A Solvay-csoportkép és az okostelefon között így közvetlen szellemi leszármazás húzható. A fényképen látható emberek vitája nem maradt könyvtárakban. Milliárdnyi apró kapcsoló formájában ott dolgozik a modern világ szinte minden információs eszközében.

21. fejezet - Lézer, atomóra és a kvantumtechnológia első hulláma

A tranzistor csak az egyik látványos következménye volt a kvantummechanikának. A huszadik század második felében egész technológiai család épült azokra a jelenségekre, amelyek 1927-ben még az elmélet alapjairól szóló viták tárgyai voltak. A lézer, az atomóra, a mágneses rezonancia és számos érzékelő mind kvantumos energiaszintekre és átmenetekre támaszkodik.

A lézer alapgondolatának egyik gyökere Einstein 1916–1917-es sugárzáselmélete. Einstein megkülönböztette a spontán és stimulált emissziót. Egy gerjesztett atom magától is kibocsáthat fotont, de megfelelő energiájú sugárzás hatására olyan foton kibocsátására is készíthető, amely az eredeti sugárzással összehangolt tulajdonságokat hordoz. Ebből a folyamatból koherens, rendkívül rendezett fény hozható létre.

Az első működő lézerek csak 1960 körül születtek, miután a mikrohullámú maserek fejlesztése megmutatta az alapelv gyakorlati működését. A lézer kezdetben

megoldást kereső találmánynak tűnhetett. Később távközlés, ipari megmunkálás, adattárolás, sebészet, mérés, vonalkód-leolvasás és számtalan kutatási módszer alapja lett.

Az atomóra más oldalról használja a kvantumelméletet. Az atomok energiaszintjei rendkívül pontos átmeneti frekvenciákat határoznak meg. Ha ezt a frekvenciát időmérés referencijelévé tesszük, az óra pontossága nagyságrendekkel meghaladhatja a mechanikus vagy hagyományos elektronikus órákét. A modern navigációs rendszerek, köztük a műholdas helymeghatározás, atomórák nélkül nem működnének megfelelően. A rendszerben ráadásul Einstein relativitáselméleti korrekcióira is szükség van. A hétköznapi telefon helymeghatározása így egyszerre épít a relativitás és a kvantumfizika két nagy forradalmára.

A mágneses rezonancia szintén a kvantum spin fogalmára támaszkodik. Atommagok mágneses térben meghatározott energiaszinteket vehetnek fel, rádiófrekvenciás gerjesztéssel pedig átmenetek hozhatók létre közöttük. A jelenségből kémiai szerkezetvizsgálati módszer, majd orvosi MRI-technológia fejlődött. A beteg számára a vizsgálat nem kvantummechanikai gondolkísérlet, hanem konkrét diagnosztikai eszköz.

A kvantumtechnológia első hulláma tehát olyan eszközökből állt, amelyek kvantumjelenségeket használnak, de működésük során többnyire nem szükséges egyenként kontrollálni komplex kvantumállapotokat. Tranzisztor, lézer, atomóra, félvezető dióda és MRI már önmagában is megváltoztatta a civilizációt. A huszadik század végén azonban egy új ambíció jelent meg: nemcsak használni a kvantumhatásokat, hanem közvetlenül manipulálni a szuperpozíciót és az összefonódást információfeldolgozás céljára.

Ezzel a kvantummechanika alapjainak egykor filozofikusnak tűnő kérdései mérnöki problémákká alakultak. Hogyan tartható fenn egy szuperpozíció? Hogyan kerülhető el, hogy a környezet túl gyorsan tönkretegye a koherenciát? Hogyan hozható létre és mérhető összefonódás? Hogyan lehet a kvantumállapotot úgy manipulálni, hogy a mérés végén hasznos klasszikus eredményt kapjunk?

A történet különös iróniája, hogy Bohr és Einstein vitája a mérésről és az összefonódásszerű korrelációkról később technológiai erőforrássá vált. Ami 1927-ben elsősorban a valóság természetéről szóló kérdés volt, abból a huszonegyedik századra kvantumkommunikációs

protokoll, szenzor és számítási architektúra lett.

A „kvantumtechnológia” ma divatos szó, de nem minden modern eszköz ugyanahhoz a technológiai nemzedékhez tartozik. Az első kvantumforradalom a kvantummechanika megértésére épülő eszközöket hozta létre. A második olyan technológiákat próbál építeni, amelyekben egyedi kvantumállapotok szuperpozícióját, összefonódását és mérését tudatosan kontrolláljuk. Mindkettő gyökere visszanyúlik azokhoz a kérdésekhez, amelyeket a Solvay-konferencia résztvevői vitattak.

22. fejezet - EPR, Bell és a kísérteties távolhatás

1935-ben Einstein, Podolsky és Rosen olyan tanulmányt publikált, amelynek címe azt kérdezte, tekinthető-e teljesnek a fizikai valóság kvantummechanikai leírása. A cikk hosszú ideig filozófiai természetű kritikának tűnt. Három évtizeddel később John Bell mutatta meg, hogy a vita bizonyos része kísérleti formába önthető.

Az EPR-gondolatmenet lényege két olyan rendszer korrelációja, amelyek korábban kölcsönhatásban álltak, majd eltávolodtak egymástól. A kvantummechanika szerint közös állapotuk úgy írható le, hogy az egyik rendszeren végzett mérés eredménye erősen összefügg a másikon kapott eredménnyel. Einstein számára a probléma akkor válik élessé, ha a két rendszer már olyan messze van, hogy a relativitás szerint semmilyen fénysebességnél gyorsabb oksági hatás nem kötheti össze őket.

Ha az egyik oldalon választott mérésből biztos következtetést tehetünk a másik oldal valamely tulajdonságára, akkor Einstein szerint ésszerű azt gondolni, hogy a távoli részecskének ez a tulajdonsága

már a mérés előtt is létezett. Ha több, egymással össze nem egyeztethető tulajdonságra is ilyen következtetést tehetünk, a kvantummechanika állapotleírása nem tartalmazhat minden valóságelemet. Innen ered a „rejtett változók” gondolata: talán léteznek további fizikai paraméterek, amelyek meghatározzák az eredményeket, csak a standard kvantumelmélet nem írja le őket.

John Bell 1964-ben olyan egyenlőtlenségeket vezetett le, amelyeknek minden bizonyos típusú lokális rejtett változós elméletben teljesülniük kell. A kvantummechanika viszont egyes összefonódott állapotokra olyan korrelációkat jósol, amelyek megsérthetik ezeket a határokat. Ezzel a filozófiai kérdésből mérhető különbség lett.

Az 1970-es és 1980-as évektől egyre kifinomultabb kísérletek vizsgálták a Bell-egyenlőtlenségeket. Alain Aspect és munkatársai fontos eredményei, majd későbbi „loophole-free” kísérletek egyre szigorúbb feltételek között erősítették meg a kvantummechanika jóslatait. A természet korrelációi nem írhatók le egyszerűen olyan lokális modellben, amelyben minden mérési eredmény előre rögzített, egymástól térbelileg független rejtett tulajdonságokból származik.

Ez nem jelenti azt, hogy használható információt lehetne a fénynél gyorsabban küldeni. A kvantumkorrelációk nem adnak egyszerű szuperluminális távíró. Az összefonódás mégis mélyen sérti a klasszikus intuíciót arról, hogyan lehet két távoli rendszer állapotát egymástól függetlenül elképzelni.

A Bell-kísérletek fényében Einstein kritikája egyszerre bizonyult termékenynek és részben téves irányúnak. A lokális realizmus bizonyos formái nem tarthatók fenn. De éppen Einstein ragaszkodása a kérdéshez tette lehetővé, hogy a kvantumelmélet egyik legfurcsább aspektusa világosan megfogalmazódjon. Ha egyszerűen elfogadta volna az ortodox nyelvet, talán később születik meg az a kérdéssor, amely a kvantuminformáció alapjává vált.

Az összefonódás ma nemcsak elméleti különlegesség. Kvantumkriptográfiai protokollokban, kvantumteleportációban és kvantumszámításban erőforrásként használható. A 2022-es fizikai Nobel-díjat Alain Aspect, John Clauser és Anton Zeilinger kapta az összefonódott fotonokkal végzett kísérletekért, a Bell-egyenlőtlenségek megsértésének megállapításáért és a kvantuminformáció-tudomány úttörő munkáiért. Ez az elismerés szimbolikusan is összekötötte az 1935-ös EPR-vitát a huszonegyedik századi technológiával.

A Solvay-konferencia fényképe így új jelentést kap. Einstein és Bohr vitája sokáig filozófiai csúcspontként szerepelt a történelemkönyvekben. Ma már tudjuk, hogy a vita egyik utóda kísérleti fizika és mérnöki kutatás lett. A „kísérteties” korrelációkból laboratóriumi erőforrás lett.

23. fejezet - A kvantumszámítógép felé

A klasszikus számítógépek tranzisztorokból épülnek, vagyis közvetve már eleve kvantumfizikai eszközök. A kvantumszámítógép fogalma mégis más elvet jelent. Az információt kvantumállapotokban kódolja, és a szuperpozíciót, az összefonódást, valamint az interferenciát számítási erőforrásként próbálja kihasználni.

Az ötlet egyik fontos kiindulópontja Richard Feynman 1980-as évekbeli felismerése volt: a kvantumrendszerek klasszikus számítógépes szimulációja rendkívül nehézé válhat, mert a rendszer állapotterének mérete exponenciálisan nő a komponensek számával. Talán éppen kvantumos eszközzel lehet természetesen szimulálni a kvantumvilágot. David Deutsch később az univerzális kvantumszámítás elméletét fejlesztette tovább.

A klasszikus bit 0 vagy 1 lehet. A kvantumbit, a qubit, e két alapállapot szuperpozíciójában is lehet. Ez azonban nem azt jelenti, hogy egyszerűen „egyszerre 0 és 1”, ahogyan a populáris magyarázat gyakran mondja. A kvantumállapot komplex amplitúdókkal rendelkezik, a

műveletek pedig ezeket az amplitúdókat alakítják úgy, hogy a kívánt eredményhez tartozó valószínűség felerősödjön, mások pedig interferenciával gyengüljenek.

A kvantumszámítás egyik áttörését Peter Shor 1994-es algoritmusai jelentette. Megmutatta, hogy elég nagy és hibajavított kvantumszámítógép hatékonyan faktorálhat nagy egész számokat. Mivel több elterjedt nyilvános kulcsú kriptográfiai rendszer biztonsága a faktorálás klasszikus nehézségére épül, az eredmény azonnal gyakorlati figyelmet keltett. Lov Grover algoritmusai más típusú keresési problémákban kínált kvantumos gyorsítást.

A hardver azonban sokkal nehezebbnek bizonyult, mint az elméleti algoritmusok megfogalmazása. A qubitek rendkívül érzékenyek környezetükre. A dekoherencia gyorsan tönkreteszi a kívánt kvantumállapotot. A műveletek zajosak, a mérés pedig visszafordíthatatlanul klasszikus eredményt ad. A hibajavítás ezért kulcskérdés. A klasszikus biteket egyszerűen másolhatjuk, kvantumállapotot viszont az ismeretlen állapotokra vonatkozó no-cloning tétel miatt nem klónozhatunk tetszőlegesen. A kvantum-hibajavítás ezért összefonódott kódolással, közvetett hibaméréssel működik.

Több fizikai platform versenyez: szupravezető áramkörök, csapdázott ionok, semleges atomok, fotonok, félvezető spinrendszerek és más megoldások. Mindegyiknek saját előnyei és problémái vannak. A technológiai fejlődés gyors, a túlzó ígéretekkel mégis óvatosan kell bánni. A mai kvantumprocesszorok már képesek összetett kísérletekre és speciális feladatokra, de a széles körben használható, nagyméretű, hibajavított kvantumszámítógép továbbra is mérnöki kihívás.

A történeti kapcsolat 1927-tel mégis világos. Szuperpozíció, komplementaritás, mérés, összefonódás, kvantumállapot: ugyanazok a fogalmak kerülnek mérnöki specifikációkba, amelyek egykor Einstein és Bohr vitájának filozófiai nyelvét alkották. A kvantumszámítógép tervezője számára a mérés nem elvont probléma, hanem olyan művelet, amelyet pontosan időzíteni kell. A dekoherencia nem filozófiai kifejezés, hanem hibaforrás. Az összefonódás nem paradoxon, hanem erőforrás.

A kvantuminformatika ezért megváltoztatta az alapkutatás és alkalmazás viszonyát. Korábban sok fizikus úgy gondolta, a kvantummechanika értelmezési vitái nem befolyásolják a laboratóriumi munkát. Ma az alapfogalmak szigorú elemzése közvetlenül új

protokollokhoz és eszközökhöz vezethet. Az információ fogalma bekerült a kvantumfizika központjába.

Einstein alighanem továbbra sem lenne elégedett egy kizárólag operacionális válasszal arra, mi a kvantumállapot. Bohr talán örömmel látná, hogy a kísérleti elrendezés jelentősége minden kvantumtechnológiában alapvető. A mai fizika azonban már túlhaladt a két régi álláspont egyszerű ismétlésén. A dekoherenciaelmélet, a kvantuminformáció, a modern Bell-kísérletek és a különböző értelmezések új fogalmi térképet hoztak létre.

A kvantumszámítógép ezért nem a Solvay-vita „végső megoldása”. Inkább annak bizonyítéka, hogy a vita kérdései száz évvel később is termékenyek. A fizika egyik legmélyebb filozófiai problémájából technológiai kutatási program lett.

24. fejezet - Mit látunk ma a fényképen?

Ha ma ránézünk Benjamin Couprie 1927-es felvételére, nehéz úgy tenni, mintha nem ismernénk a következő száz év történetét. Einstein arcában látjuk a relativitást, az EPR-paradoxont és a világhírű emigránst. Bohrban az atommodellt, a komplementaritást és a háborús menekültet. Heisenbergben a határozatlansági relációt, majd a német uránprogram vitatott szereplőjét. Schrödingerben a hullámegyenletet és a macskát. Diracban az antianyagot. Bornban a valószínűséget. Curie-ben a radioaktivitás hőskorát és annak egészségi árát.

A kép azonban éppen akkor válik igazán érdekessé, ha egy pillanatra megpróbáljuk elfelejteni mindezt. 1927 októberében a jövő még nyitott. A résztvevők nem tudják, hogy néhány év múlva milyen politikai rendszer uralja Németországot. Nem tudják, hogy atommaghasadásból fegyver készül. Nem láttak tranzisztort, lézert vagy számítógépes chipet. Az antianyag kísérleti felfedezése még előttük áll. Bell tétele, kvantumteleportáció és qubit fogalma pedig évtizedekre van.

Amit viszont már tudnak, az önmagában rendkívüli. Tudják, hogy a klasszikus fizika nem ad teljes leírást az atomokról. Tudják, hogy a fény hullám- és részecskejellegű tulajdonságokat mutat. Tudják, hogy az anyagi részecskékhez hullámok kapcsolhatók. Ismerik a Schrödinger-egyenletet, Heisenberg mechanikáját, Born valószínűségi szabályát és a határozatlansági relációt. A fizika matematikai forradalma gyakorlatilag megtörtént. A jelentését próbálják utolérni.

Ez a helyzet ritka a tudomány történetében. Sokszor az elméleti fogalom és a matematikai eszköz lassan fejlődik együtt. A kvantummechanikában néhány év alatt olyan formalizmus jött létre, amelynek filozófiai következményeit még alkotói sem értették ugyanúgy. A számítás megelőzte a közös világképet.

A fénykép ezért a tudomány természetéről is beszél. A nagy áttörés nem mindig jelent teljes megértést. Lehet egy elmélet rendkívül sikeres úgy, hogy használói vitatkoznak arról, mit állít a valóságról. Lehet két fizikus ugyanazzal az egyenlettel dolgozó kolléga, miközben egészen más ontológiában hisz. A tudomány nem vallási hitvallás, amely minden kérdésben egységet követel. Működő közös módszer és ellenőrizhető jóslatok mellett tartós értelmezési pluralizmus is létezhet.

A kép másik tanulsága a nemzetköziség. A kvantummechanika nem egyetlen ország találmánya. Német, dán, osztrák, brit, francia, belga, svájci, amerikai és más kutatók munkája kapcsolódott össze. A politikai nacionalizmus később szétverte ezt a hálózatot, de magát a tudást nem tudta nemzeti határok közé zárni. Az emigráció átrendezte a tudomány földrajzát, az elméletek pedig tovább éltek új intézményekben.

A harmadik tanulság az alapkutatás kiszámíthatatlansága. A Solvay-konferencia résztvevői az elektron és foton természetéről vitatkoztak. Nem az volt a céljuk, hogy okostelefont, GPS-t, MRI-készüléket vagy kvantumszámítógépet hozzanak létre. Mégis az általuk megalkotott elmélet nélkül ezek a technológiák nem léteznének jelenlegi formájukban. A tudomány gyakorlati haszna gyakran abból születik, hogy valaki először minden közvetlen haszon nélkül akar megérteni egy furcsa jelenséget.

A negyedik tanulság a tévedés értéke. Einstein nem tudta megmutatni, hogy a kvantummechanika hibás. De kritikája nélkül talán kevésbé élesen fogalmazódik meg a teljesség, lokálitás és összefonódás problémája. De Broglie pilotahulláma hosszú időre háttérbe szorult, majd Bohm munkájában új életre kelt. Schrödinger macskája

kritikai példának indult, később egész tudományterület szimbóluma lett. A zsákutcának látszó gondolatok is visszatérhetnek új összefüggésben.

A huszonegyedik század elején a kvantummechanika továbbra is a valaha tesztelt legsikeresebb fizikai elméletek egyike. A kvantumelektrodinamika előrejelzései elképesztő pontosságúak, a kvantumkémia az anyag szerkezetét számolja, a félvezetőipar és a fotonika mindennapi infrastruktúrát épít rá. Mégis nincs mindenki által elfogadott válasz arra, hogyan kell értelmezni a hullámfüggvényt, a mérést vagy a valószínűséget.

A Solvay-fénykép ebben a tekintetben nem csak múltbeli emlék. A rajta ülők vitája tovább él. Ma más matematikával, pontosabb kísérletekkel és új technológiákkal tesszük fel a kérdéseket, de a mag ugyanaz: mit mond a kvantumelmélet a világról, és mi a kapcsolat a matematikai állapot, a mérés és a fizikai valóság között?

A fénykép tehát nem azért változtatta meg a világot, mert egy kamera exponált Brüsszelben. Azért vált jelképpé, mert egyetlen képkockán látható rajta az a közösség, amelynek vitáiból és egyenleteiből a modern

technológiai civilizáció egyik alaprétege kinőtt. Az arcok ma már történelem. A kérdéseik nem azok.

HÁTTÉRGYÁR

Utószó

Száz év távlatából könnyű a kvantummechanika kialakulását elkerülhetetlen folyamatként látni. Mintha Planck kvantuma szükségképpen Einstein fotonjához, az pedig Bohr atomjához, de Broglie hullámaihoz, Heisenberg mátrixaihoz és Schrödinger egyenletéhez vezetett volna. A valós történet sokkal bizonytalanabb volt. A szereplők gyakran nem tudták, melyik ötlet bizonyul tartósnak, és ugyanazt az eredményt egészen másképpen értelmezték.

Éppen ez teszi az 1927-es Solvay-konferenciát különlegessé. Egy olyan pillanatot őriz, amikor a fizika új nyelve már megszületett, de a jelentését még tárgyalták. A konferencia nem zárta le a kvantumforradalmat. Inkább láthatóvá tette annak valódi természetét: a modern tudomány egyszerre matematikai, kísérleti, filozófiai és emberi vállalkozás.

Az emberi oldal különösen fontos. A résztvevők nem ikonokként éltek. Voltak ambícióik, félelmeik, előítéleteik, barátságaik és konfliktusaik. Egyesek emigrációba kényszerültek, mások diktatúrák intézményeiben próbáltak túlélni, néhányuk háborús programokba került. Az elméletek élettörténetekben

mozogtak, nem steril tankönyvi térben.

A tudományos oldal pedig arra emlékeztet, hogy a bizonytalanság nem a tudomány gyengesége. A jó tudomány képes pontosan megmutatni, hol vannak a bizonyosság határai. Heisenberg relációja matematikai korlátot fogalmaz meg. Born valószínűségi szabálya nem tudatlanság beismerése, hanem tesztelhető előrejelzések rendszere. Einstein kritikája nem az irracionalitás védelme, hanem következetes igény egy teljesebb elméletre.

A modern technológia közben kézzelfoghatóvá tette a kvantummechanika gyakorlati erejét. A tranzisztor, a lézer, az atomóra, a mágneses rezonancián alapuló képalkotás és a kvantuminformatika olyan területek, amelyek működésében az elmélet közvetlenül jelen van. A száz évvel ezelőtti vita így sajátos módon folytatódik: ma már mérnökök is ugyanazokkal a fogalmakkal dolgoznak, amelyekről Einstein és Bohr hosszasan vitatkozott.

Talán ezért nézzük újra és újra azt a fényképet. Nem azért, mert megmutatja, milyen a zseni arca. Hanem azért, mert megmutatja, milyen a tudás egy nagy fordulat pillanatában: sok ember, sok nézet, kevés biztos

kapaszkodó, rengeteg kérdés és néhány egyenlet, amelyek végül messzebb jutnak alkotóik képzeleténél.

HÁTTÉRGYÁR

Kronológia

1897

J. J. Thomson kísérletei nyomán az elektron önálló részecskeként kerül a fizika középpontjába.

1900

Max Planck a fekete-test sugárzás elméletében bevezeti az energia kvantálásának gondolatát.

1905

Einstein fénykvantumokkal magyarázza a fotoelektromos jelenséget, és ugyanebben az évben publikálja a speciális relativitáselmélet alapjait.

1911

Rutherford atommagmodellt javasol; Brüsszelben megrendezik az első Solvay-fizikatanácsot.

1913

Niels Bohr kvantált elektronpályákkal magyarázza a hidrogénatom színeképét.

1915

William Henry Bragg és William Lawrence Bragg Nobel-díjat kap a röntgenkrisztallográfiai munkáért.

1916-1917

Einstein kidolgozza a sugárzás abszorpciójának, spontán és stimulált emissziójának statisztikai elméletét.

1922

Niels Bohr megkapja a fizikai Nobel-díjat az atom szerkezetének és sugárzásának kutatásáért.

1923

Arthur Compton publikálja a róla elnevezett szórási jelenség eredményeit; de Broglie kidolgozza az anyaghullám gondolatát.

1924

Louis de Broglie doktori értekezésében rendszerezi az anyaghullám-elméletet; Bose és Einstein új kvantumstatisztikai eredményeket dolgoz ki.

1925

Heisenberg megalkotja a mátrixmechanika alapjait; Born és Jordan felismeri és továbbfejleszti a matematikai szerkezetet; Pauli megfogalmazza kizárási elvét.

1926

Schrödinger publikálja hullámmechanikai tanulmányait; Born valószínűségi értelmezést ad a hullámfüggvénynek.

1927. február-március

Heisenberg Koppenhágában kidolgozza a határozatlansági relációt.

1927. szeptember

Bohr Comóban ismerteti a komplementaritás programját.

1927. október 24-29.

Brüsszelben megrendezik az ötödik Solvay-fizikatanácsot „Elektronok és fotonok” címmel.

1928

Dirac publikálja az elektron relativisztikus kvantumelméletét; megjelenik a Solvay-konferencia hivatalos jegyzőkönyve.

1929

De Broglie fizikai Nobel-díjat kap az elektron hullámtermészetének felismeréséért.

1930

A hatodik Solvay-konferencián Einstein fotondoboz-gondolatkísérlettel támadja az energia-idő határozatlansági kapcsolatot; Bohr válaszában relativisztikus gravitációs érvet használ.

1932

Chadwick felfedezi a neutron; Carl Anderson felfedezi a pozitront; Heisenbergnek ítélik a fizikai Nobel-díjat.

1933

Schrödinger és Dirac Nobel-díjat kap; Hitler hatalomra jutása után Einstein, Born és több más tudós elhagyja Németországot.

1935

Megjelenik az Einstein-Podolsky-Rosen-tanulmány; Schrödinger megfogalmazza híres macska-gondolatkísérletét és elemzi az összefonódást.

1938-1939

Hahn és Strassmann kísérleti eredményeit Meitner és Frisch maghasadásként értelmezi; a láncreakció és az atomfegyver lehetősége valós politikai kérdéssé válik.

1942

Elindul a Manhattan-terv nagyipari szakasza; Chicagóban Fermi csoportja létrehozza az első önfenntartó szabályozott nukleáris láncreakciót.

1945

Trinity-kísérlet; Hiroshima és Nagaszaki atomtámadása.

1947

Bardeen és Brattain a Bell Laboratoriesben létrehozza az első működő pontkontakt tranzisztort.

1952

David Bohm determinisztikus rejtett változós kvantumelméletet dolgoz ki, új életet adva de Broglie vezetőhullám-gondolatának.

1954

Max Born Nobel-díjat kap, különösen a hullámfüggvény statisztikai értelmezéséért.

1956

Bardeen, Brattain és Shockley Nobel-díjat kap a félvezetők kutatásáért és a tranzistorhatás felfedezéséért.

1960

Megszületnek az első működő lézerek.

1964

John Bell publikálja tételét a lokális rejtett változós elméletek és a kvantummechanika kísérletileg megkülönböztethető jóslatairól.

1980-as évek

Feynman és Deutsch munkái nyomán körvonalazódik a kvantumszámítógép modern fogalma.

1994

Peter Shor publikálja kvantumoz faktorálási algoritmusát.

2022

Alain Aspect, John Clauser és Anton Zeilinger fizikai Nobel-díjat kap az összefonódással, Bell-egyenlőtlenségekkel és kvantuminformációval kapcsolatos úttörő kísérletekért.

2027

Száz éve annak, hogy az ötödik Solvay-konferencia résztvevői elkészítették a modern fizika egyik legismertebb csoportképét.

A fénykép szereplői

Auguste Piccard (1884-1962)

Svájci fizikus és felfedező, a magaslégköri ballonrepülések és később a mélytengeri kutatás úttörője.

Émile Henriot (1885-1961)

Francia fizikus és kémikus, a radioaktivitás és ultracentrifugálás kutatója.

Paul Ehrenfest (1880-1933)

Osztrák-holland elméleti fizikus, Lorentz leideni utódja, a statisztikus fizika és kvantumelmélet fontos közvetítő alakja.

Édouard Herzen (1877-1936)

Belga kémikus és tudományszervező, a Solvay-intézet környezetének szereplője.

Théophile De Donder (1872-1957)

Belga matematikai fizikus, a termodinamika és relativitás kutatója.

Erwin Schrödinger (1887-1961)

A hullámmechanika és a Schrödinger-egyenlet megalkotója, 1933-as Nobel-díjas.

Jules-Émile Verschaffelt (1870-1955)

Belga fizikus, főleg termodinamikai és alacsony hőmérsékleti kutatásokkal foglalkozott.

Wolfgang Pauli (1900-1958)

Az elektronspin és atomszerkezet megértésében alapvető kizárási elv szerzője, 1945-ös Nobel-díjas.

Werner Heisenberg (1901-1976)

A mátrixmechanika és a határozatlansági reláció egyik megalkotója, 1932-es Nobel-díjas.

Ralph H. Fowler (1889-1944)

Brit fizikus és asztrofizikus, a statisztikus mechanika és csillagfizika jelentős kutatója.

Léon Brillouin (1889-1969)

Francia fizikus, a szilárdtestfizika, hullámterjedés és információelméleti gondolkodás fontos alakja.

Peter Debye (1884-1966)

Holland-amerikai fizikus és kémikus, molekulaszervezet, dipólusmomentumok és szilárdtestfizika kutatója, 1936-os kémiai Nobel-díjas.

Martin Knudsen (1871-1949)

Dán fizikus, a ritka gázok és molekuláris áramlás kutatója.

William Lawrence Bragg (1890-1971)

A röntgenkrisztallográfia úttörője, 1915-ben huszonöt évesen Nobel-díjas.

Hendrik A. Kramers (1894-1952)

Holland elméleti fizikus, Bohr közeli munkatársa, a kvantumelmélet és diszperzióelmélet fontos kutatója.

Paul A. M. Dirac (1902-1984)

A kvantummechanika formalizmusának egyik megalkotója, az elektron relativisztikus egyenletének és az antianyag-előrejelzésnek szerzője, 1933-as Nobel-díjas.

Arthur H. Compton (1892-1962)

A foton részecskeszerű impulzusát bizonyító Compton-effektus felfedezője, 1927-es Nobel-díjas.

Louis de Broglie (1892-1987)

Az anyaghullám hipotézisének megalkotója, 1929-es Nobel-díjas.

Max Born (1882-1970)

A mátrixmechanika egyik kialakítója és a hullámfüggvény valószínűségi értelmezésének szerzője, 1954-es Nobel-díjas.

Niels Bohr (1885-1962)

Az atommodell, a megfelelési elv és a komplementaritás központi alakja, 1922-es Nobel-díjas.

Irving Langmuir (1881-1957)

Amerikai fizikai kémikus, felületi jelenségek és gázkisülések kutatója, 1932-es kémiai Nobel-díjas.

Max Planck (1858-1947)

A kvantumhipotézis megalkotója, 1918-as fizikai Nobel-díjas.

Marie Skłodowska Curie (1867-1934)

A radioaktivitás kutatásának úttörője, 1903-as fizikai és 1911-es kémiai Nobel-díjas.

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928)

Az elektronelmélet és elektromágnesség nagy alakja, 1902-es Nobel-díjas, az 1927-es konferencia elnöke.

Albert Einstein (1879-1955)

A relativitáselmélet, a fénykvantum és számos kvantumstatisztikai felismerés szerzője, 1921-es Nobel-díjas.

Paul Langevin (1872-1946)

Francia fizikus, a mágnesség, relativitás és ultrahang kutatója, jelentős közéleti szereplő.

Charles-Édouard Guye (1866-1942)

Svájci fizikus, az elektron tömegének sebességfüggését és az elektrodinamika kérdéseit vizsgálta.

C. T. R. Wilson (1869-1959)

A ködkamra kifejlesztője, amely láthatóvá tette töltött részecskék nyomait; 1927-es Nobel-díjas.

Owen Willans Richardson (1879-1959)

A termoelektron-emisszió kutatója, 1928-as Nobel-díjas.

HÁTTÉRGYÁR

Források és ajánlott irodalom

A könyv történeti váza elsősorban a Solvay-konferencia hivatalos jegyzőkönyvére, a Nobel Alapítvány életrajzi és tudománytörténeti anyagaira, az American Institute of Physics történeti archívumaira, valamint a kvantummechanika történetének modern szakirodalmára támaszkodik. A következő művek és gyűjtemények különösen hasznosak a téma további tanulmányozásához.

Institut International de Physique Solvay: Électrons et photons. Rapports et discussions du cinquième Conseil de physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927. Gauthier-Villars, Paris, 1928.

Guido Bacciagaluppi - Antony Valentini: Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference. Cambridge University Press, 2009.

Abraham Pais: Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World. Oxford University Press, 1986.

Abraham Pais: Niels Bohr's Times: In Physics, Philosophy, and Polity. Oxford University Press, 1991.

Max Jammer: The Conceptual Development of Quantum Mechanics. McGraw-Hill, 1966; későbbi kiadásokban is.

Max Jammer: The Philosophy of Quantum Mechanics. Wiley, 1974.

David C. Cassidy: Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg. W. H. Freeman, 1992.

Walter Isaacson: Einstein: His Life and Universe. Simon & Schuster, 2007. Elsősorban életrajzi háttérként használható; a kvantumvita részleteihez célszerű szakmonográfiákkal együtt olvasni.

Niels Bohr: Atomic Theory and the Description of Nature. Cambridge University Press, 1934; valamint Atomic Physics and Human Knowledge. Wiley, 1958. A komplementaritás és a kvantummechanika értelmezésének elsődleges forrásai.

Albert Einstein – Max Born: The Born-Einstein Letters. Levelezésük kiadott kötetei fontos elsődleges források a kvantummechanika valószínűségi jellegéről folytatott eszmecserehez.

Albert Einstein – Boris Podolsky – Nathan Rosen: „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be

Considered Complete?”, *Physical Review*, 1935.

John S. Bell: „On the Einstein Podolsky Rosen Paradox”, *Physics*, 1964.

NobelPrize.org: a fizikai Nobel-díjak történeti összefoglalói, valamint Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Dirac, Born, de Broglie, Compton, Bragg és más résztvevők hivatalos Nobel-életrajzai és díjindoklásai.

American Institute of Physics, Niels Bohr Library & Archives: Einstein- és Heisenberg-történeti kiállítások, valamint az 1927-es Solvay-konferencia fényképének és résztvevőinek dokumentációja.

International Solvay Institutes: a Solvay-konferenciák archívuma, az 1927-es „Electrons et photons” tanácskozás történeti anyagai, fényképei és digitalizált konferenciakötetei.

U.S. Department of Energy: a Manhattan-terv hivatalos történeti gyűjteményei és összefoglalói.

A kvantumtechnológia későbbi fejlődéséhez a Nobel-díjak tranzisztorról, lézerről, félvezetőről és összefonódásról szóló háttéranyagai, továbbá egyetemi kvantuminformatikai jegyzetek és szakkönyvek adnak

megbízható bevezetést.

HÁTTÉRGYÁR

Szerkesztői megjegyzés

Ez a kötet tudománytörténeti ismeretterjesztő munka. A fizikai fogalmakat a történet megértéséhez szükséges mélységben tárgyalja, nem helyettesít egyetemi kvantummechanika-tankönyvet. A szövegben szereplő gondolat kísérleteknél és visszaemlékezéseknél különösen fontos volt megkülönböztetni a kortárs dokumentumokat a későbbi legendáktól. Ahol a történeti szakirodalom vitát jelez, a könyv nem állít bizonytalan részleteket lezárt tényként.

$$E = h\nu$$

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi$$

A modern világ születésének története

1927 őszén Brüsszelben egyetlen teremben gyűlt össze szinte mindenki, aki a modern fizikát megteremtette. Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Planck és Marie Curie ugyanannak a kérdésnek feszült neki: milyen természetű a valóság? A vita túlmutatott a fizikán. A kvantumforradalom új képet adott az anyagról, a megismerésről és a bizonyosságról, és végül elvezetett az atomfegyvertől a félvezetőkön és a számítógépen át a kvantumtechnológiáig.

Ez a könyv nem képletek tankönyve, hanem emberek története: zseniké, riválisoké, emigránsoké és olyan tudósoké, akik akaratukon kívül a 20. század sorsformálóivá váltak. A híres Solvay-fényképből kiindulva feltárja, hogyan született meg a modern világ egyik legmélyebb szellemi fordulata.

HÁTTÉRGYÁR

A borító AI felhasználásával készült