

SZÁZÉVES KVANTUMFIZIKA

A szerző matematika–fizika szakos gimnáziumi tanár Bajorországban és kutató a német Szövetségi Véderő (Bundeswehr) neubibergeri egyetemén (vö. „Mérleg”, 98/1. 80. l.), folyóiratunk főmunkatársa.

1900. december 14-ét tekinti a fizikusok „céhe” a kvantumfizika születésnapjának. Ekkor mutatta be *Max Planck* „kétségbeesett tettként” a feketetest sugárzására vonatkozó munkáját a Német Fizikai Társaságnak. Az addig folytonos mennyiségekkel dolgozó fizika tudományában az „adagok” bekerülésével rendkívül izgalmas, máig és ki tudja még meddig tartó, vitákkal tarkított, lezáratlan fejezet kezdődött. A századik évforduló kapcsán minden fizikai folyóirat megemlékezett az eseményről, a szakma valamennyi jeles egyénisége megszólalt az ügyben. Az elmélet jelentőségét talán *Armin Hermann*-nak, a stuttgarteri egyetem tudománytörténet-professorának szavaival lehetne a legjobban jellemezni: „Egy fizikai elméletet két kritérium alapján lehet megítélni: filozófiai-ismeretelméleti jelentősége és a belőle adódó technikai alkalmazhatóság alapján. Mindkét kritérium alapján a kvantumelmélet az egész 20. század legfontosabb gondolati teremtménye. A műszaki alkalmazások példái a mézer és lézer, valamint a tranzisztor, tehát az egész mikroelektronika. Ami pedig a filozófiai-ismeretelméleti jelentőséget illeti, itt csak az úgynevezett »determinizmus« cáfolatát említjük, amely az egész 18. és 19. századi gondolkodást uralta. *Werner Heisenberg* 1927-ben kimondott híres határozatlansági relációja azt mondja, hogy azok a feltételek, amelyeken a determinizmus nyugszik, elvileg nem teljesíthetők. Ezzel feloldódik az akaratszabadság problémája, egyike a »hét világrejtélynek«, melyeket *Emil Du Bois-Reymond* 1880-ban megfogalmazott. A világtörténet nem determinált, az ember akaratszabadsága nem pusztán fikció.”¹ Az alkalmazások tekintetében talán érdemes megemlíteni azt, hogy egyes becslések szerint a kvantumelmélet által adott műszaki lehetőségek bizonyos nemzeteknél a bruttó nemzeti termék egynegyedét teszik ki,² míg más becslések szerint ez 30 százalékra is rúg.³

1 HERMANN, ARMIN: „Ich dachte mir nicht viel dabei«, Die wichtigste Gedankenschöpfung des 20. Jahrhunderts: Wie Max Planck auf die Idee der Quantentheorie kam”, *Süddeutsche Zeitung*, 2000. december 9–10.

2 GÖRNITZ, THOMAS: „Immer Ärger mit den Quanten”, *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 2001. január 23., 19.

3 TEGMARK, MAX – WHEELER, JOHN ARCHIBALD: „100 Years of Quantum Mysteries”, *Scientific American*, 2001. február, 54–61.; németül: „100 Jahre Quantentheorie”, *Spektrum der Wissenschaft*, 2001. április, 68–76.

Folyóirat-tanulmányok között tallózva kívánunk bepillantást nyújtani először a kvantumfizika „bizarr világába” (1), majd egy érdekes értelmezési lehetőségre világítunk rá (2). S végül az újabb jellegű kvantumelméleti prognózisokat megerősítő kísérletről számolunk be (3).

1. A kvantumfizika bizarr világa

Negyedszázaddal az után, hogy Planck bemutatta a feketetest sugárzására vonatkozó munkáját, Werner Heisenberg, *Erwin Schrödinger* és sok más fizikus-matematikusi munkája révén létrejött az a matematikai elmélet, amely a kvantumelmélet alapjául szolgál. Az elmélet matematika részének kodifikálását *Neumann János* 1932-ben megjelent munkája jelentheti.⁴ A filozófiai következményeket illető diskusszió azonban csak ez után következett. Sokak véleménye szerint a kvantumvilág csak mentális konstrukció. Mások véleménye szerint mi is ebben a kvantumvilágban élünk. A szkeptikusok persze jobb elméletet követeltek, amely a „kvantum-univerzum” és a klasszikus világ közötti átmenetet is leírja.

Ha a kvantumelmélet érvényessége pusztán a mikrovilágra (atomi, szubatomi részecskékre) korlátozódnék, valószínűleg nem lenne a dolog annyira feltűnő. A dolog azért tűnik „félelmetesnek”, mert a kapott törvényszerűségeket univerzális érvényességüknek tekinthetők. Az atomok színpéldétől a bolygók pályáig minden a kvantumelmélet törvényeivel írható le. Miért nem tapasztaljuk akkor a kvantumvilág különös jelenségeit mindennapjainkban? Az elmélet tartalmaz egyféle, nagyon is „misztikus” hangzó választ: a „mérési folyamat” során a kvantumállapot a klasszikus világ egyetlen állapotára „redukálódik”.

A folyamat egyszerű rendszeren könnyen szemléltethető. A radioaktív bomlásban résztvevő atomok a klasszikus fizika szerint vagy már elbomlottak vagy még nem. Harmadik lehetőség nincs, vagyis a klasszikus logika elve (*tertium non datur*) érvényesül. Ezzel szemben a kvantumelmélet leírása a két lehetőség együtt való fennállására vállalkozik, az állapotot egyfajta szuperpozíció írja le. A kvantummechanika törvényszerűsége szerint nem lehet egyértelműen megállapítani, hogy a radioaktív felezési idő eltelté után a radioaktív bomlás tényleg végbement-e vagy nem. Az atom egy paradox állapotban van,

4 NEUMANN, JÁNOS: *A kvantummechanika matematikai alapjai*, Budapest, Akadémiai Kiadó, 1980. Az eredeti munka németül 1932-ben jelent meg a Springer kiadónál, majd 1955-ben jelent meg az angol kiadás. Érdekes, hogy a magyar fordítás az 1964-es orosz alapján készült (Sebestyén Ákos munkája). Lényegileg 1932 óta a Neumann által adott Hilbert-tér formalizmusa máig nem változott. Sikere valószínűleg nagy mértékű absztraktságának köszönhető. Vö. még FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER: *Aufbau der Physik*, München, Hanser Verlag, 1986 (2. kiad.), tk. 279. sk., valamint Uő: *Zeit und Wissen*, München, Carl Hanser Verlag, 1992, 784–785. Vö. *Mérleg*, 1992/2. 160–172.

amely a klasszikus fizikában teljesen ismeretlen. A mérés után a megfigyelő mégis a két klasszikus állapot egyikét találja. A mérés eredményét azonban előre nem tudjuk determinisztikusan, egyértelműen megadni. A kvantumelmélet alapján csak bizonyos valószínűségi előrejelzéseket tehetünk a mérés eredményére vonatkozóan.

A mérési folyamat értelmezése nem kevés fejtörést okozott fizikusoknak és filozófusoknak. A kvantumelmélet megjelenésével a világ immár nem a megfigyelőtől függetlenül létezik, miként azt a newtoni klasszikus fizikában megszoktuk. *Niels Bohr* és *Werner Heisenberg* a koppenhágai értelmezésnek nevezett következtetéseket vont le.⁵ Bohr mindig is hangsúlyozta, hogy mi klasszikus világban élünk. Ennek megfelelően egy kísérlet leírása mindig is a klasszikus fizika nyelvezetét kell, hogy használja. A kísérleti fizikus a természetet csak indirekt módon, a mérőberendezések segítségével ismeri. Ezért a kvantum rendszerek esetén mindig hozzá kell vennünk a kísérleti elrendezést is. Bohr provokatív megfogalmazásában: „Nincs külön kvantum világ, hanem csak absztrakt kvantumfizikai leírás. Helytelen azt gondolni, hogy a fizika feladata annak kitalálása, milyen is a természet. A fizika azzal foglalkozik, hogy mit mondhatunk a természetről.”⁶

Ehhez a klasszikus koppenhágai értelmezéshez csatlakozik *Anton Zeilinger*. Munkacsoportjával nemrégiben egy hatvan szénatomból álló, futball-labdához hasonló molekulát sikerült csatolt (szuperpozíciós, kevert) állapotba hoznia. Az osztrák fizikus számára – Bohr nyomán – valamely részecske megtalálása annyit jelent, hogy a megfelelő detektor, érzékelő „kattan” egyet. A dortmundi egyetem filozófusa, *Brigitte Falkenberg* is úgy véli, hogy a koppenhágai értelmezés tökéletesen megfelelő. Bohr felismerését abban látja, hogy a számunkra megmutató világ éppenséggel nem teljesen független a fizikus megismerő tevékenységétől, apparátusától és kísérleti lehetőségeitől.⁷

Ismert módon *Einstein* maga soha sem tudott kibékülni a koppenhágai iskola számára nagyon is antropomorf elképzelésével.⁸ Állítólag egyik fiatalabb kollégájának úgy értelmezte a koppenhágai elgondolásokat, hogy vajon valóban azt hiszi-e, hogy a Hold csak akkor létezik, ha megfigyeljük. Ezt az elképzelést ugyanúgy abszurdnak találta, mint a kevert állapotú radioaktív atomét. Szerinte, ha az elmélet nem képes egyértelműen, precízen megmondani, hogy az atom elbomlott-e avagy sem, akkor az elmélet nem lehet tökéletes, teljes. Ebbe a hagyományba

5 Vö.: BALOGH, V. SZ.: „A komplementaritás reneszánsza?”, *Mérleg*, 1999/3. 321–328.

6 Idézi: ZEILINGER, ANTON: „The quantum centennial”, *Nature*, 408. kötet, 2000. december 7., 641. „There is no quantum world, there is only an abstract quantum physical description. It is wrong to think that the task of physics is to find out how nature is. Physics concerns what we can say about nature.”

7 Vö. *Physikalische Blätter*, 56/12. kötet, 52.

8 Vö.: BALOGH, V. SZ.: „Einstein mítosztalanítása?”, *Mérleg*, 1995/2. 219. ssk.

sorolandók azok, akik az úgynevezett rejtett paraméterek bevezetésével kívánják az atomi folyamatok determinisztikus leírását megvalósítani. Eddig egyetlen ilyen vállalkozás sem vezetett olyan eredményre, amely a meglévő kvantumelmélettel felvehetné a versenyt. A kísérletek sokasága bizonyítja ugyanakkor ismételten a kvantumelmélet előrejelzéseinek helyességét.⁹

Alapvető kritikát gyakorolt a mérési folyamat bevett koppenhágai értelmezéséről *Peter Mittelstaedt*, a kölni egyetem kiérdemesült professzora.¹⁰ A Heisenberg-féle határozatlansági reláció, az alagúteffektus, a nem lokális jelleg, a teleportáció ma már a kvantumfizikával foglalkozó szakember hétköznapijaihoz tartozik. A mérési apparátus is az univerzálisan érvényes kvantummechanikának kell, hogy eleget tegyen. Nem tartja ennél fogva megalapozottnak, hogy a kvantumrendszer és a mérőeszköz közé szigorú határt vonjunk. Véleménye szerint ma már nem arról van szó, hogy a kvantumos jelenségeket a klasszikus fizika szemszögéből szemléltessük. A megoldatlan problémát ma a klasszikus fizika jelenti. A klasszikus fizika világa egy, a gyakorlatban bevált, de csak közelítően érvényes idealizálás lehet, vagyis végső soron egyfajta illúzió.

Tény, hogy a kísérleti fizikusok a kvantumos világ határait az utóbbi években egyre messzebbre tolták. Ma már porszemnyi nagyságú kvantumos objektumokat lehet előállítani. Az erre vonatkozó legújabb kísérleti eredményekre visszatérünk. Előbb azonban a klasszikus és kvantumos világ egyfajta összehasonlítását kísérreljük meg.

2. Klasszikus fizika: „Divide et impera” kontra kvantumelmélet – az egész több, mint a részek összege

A kvantumelmélet értelmezéséről, megértéséről szóló könyvek nagy nehézsége a megfelelő nyelvezet megtalálása. Ebből a szempontból is érdekes vállalkozás *Thomas Görnitz*nek, a frankfurti egyetem professzorának¹¹ a vállalkozása, aki népszerűsítő jellegű könyvben próbálja meg közel hozni olvasóihoz ezt a világot, gondolkodásmódot.¹² Az ő gondolataira támaszkodva próbálunk meg egy kis összevetést tenni a klasszikus és kvantumos fizika között, amely egyúttal az interpretáció bizonyos elemeivel is megismerkedtet bennünket.

9 Folyóiratunk rendszeresen számolt be ilyen jellegű kísérletekről, vö. tk. *Mérleg*, 1992/2. 221., 1996/3. 249–253., 1997/2. 124–125., 1998/2. 125–127., 1999/3. 321. sk.

10 Az ő elgondolásain alapul *Ingerborg Strohmeier* transzcendentálfilozófiai megközelítése is, vö. *Mérleg*, 1997/1. 90–91.

11 Vö. *Mérleg*, 1992/2. 160. ssk.

12 GÖRNITZ, THOMAS: *Quanten sind anders*, Die verborgene Einheit der Welt, Mit einem Vorwort von Carl Friedrich von Weizsäcker, Heidelberg–Berlin, Spektrum Akademischer Verlag, 1999, 318 l., fve 49,90 DEM.

A klasszikus fizika alapelve jól jellemezhető a régi római mondással: „Oszd meg és uralkodj!” (*Divide et impera!*). A newtoni fizika ugyanis a világot először is objektumokra bontja. Ezekre érvényesek aztán azok a determinisztikus törvények, amelyek viselkedésüket egyértelműen meghatározzák. Görnitz hasonlata szerint a klasszikus rendszerek úgy viselkednek, mint a vonatok a váltók nélküli vágányokon. Már induláskor lehet tudni, hogy hova érkeznek a vonatok. Aki tehát a klasszikus fizika törvényeit ismeri, annak minden objektum fölött hatalma van. Legalábbis így szólna a klasszikus gondolkodásmód. Még mélyebben benne él a gondolkodásunkban az a feltevés, hogy a természet nem végez ugrásokat, minden egyes változás folytonosan, folyamatosan történik. A determinisztikus törvényeknek ebbe a rendszerébe születtek bele a fizikusok – Max Planck is –, ebben szocializálódtak. Ezért a kvantumhipotézis jelentősége csak nagyon lassan vált világossá.

Max Planck posztulátuma azt jelentette, hogy van a fizikában a hatásnak egy legkisebb értéke, miként a pénzegységek között is van egy legkisebb, ami alatt már csak a pusztaság van, a „pénznélküliség” van. Albert Einstein feltételezte, hogy a fény is ilyen „szemcsés” természetű, fotonokból áll. Niels Bohrnak sikerült az atomok felépítését magyaráznia a Planck-féle feltétel segítségével. Aztán áttörést jelentett, amikor a 20-as években elsősorban Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger és nem utolsósorban Neumann János munkássága nyomán kialakult az elmélet teljes matematikai rendszere.

A kvantumelmélet döntő újdonsága a klasszikus elgondolással szemben a részeknek az egészhez való kapcsolatában mutatható meg. Az egészek lényegesen gazdagabb viselkedési formációt mutathatnak, mint ami a kiinduló részekből következne. A legtöbb esetben a „részekből való felépítettség”-ből semmit sem észlelünk. Ez azzal függ össze, hogy a kvantumelméleti leírás a rendszer „lehetőségeinek összességét” ragadja meg, illetve ezeket a lehetőségeket a „tényekre vonatkozó függvényekként” értelmezheti. A tényeket leíró klasszikus fizika a részrendszerek összegzésével (összeadásával, egymáshoz illesztésével) adja meg a rendszer leírását: „közvetlen, direkt összegeket” képez. Ezzel szemben a kvantumelméletben az összekapcsolódás „direkt szorzatokkal” történik. Egy „szorzat” több mint „egy összeg”. Következésképpen a kvantumelméletre igaz, hogy az egész több részei összegénél.

Mindezt pusztán matematikai trükknek tekinthetnénk, de jelentős és valós hatásai vannak. Egy kvantumfizikai egész majdnem soha sem azokból a részekből „áll”, amelyekből eredetileg létrejött. Ez nem pusztán a mi kényelmünktől függ, mintha nem akarnánk a rendszert alaposabban megvizsgálni. Ide tartozik, hogy ugyanaz a kvantumrendszer, ugyanaz a kvantum egész teljesen különböző részrendszerekre eshet szét. A részrendszerek annyira különbözőek lehetnek, hogy közösségük nehezen elképzelhető. Például egy speciális kvantumállapot

vagy két fotonra bomlik vagy egy elektronra és annak antirészecskéjére, pozitronra. A fotonnak – jelenlegi tudásunk szerint – nincs tömege és másodpercenként 300 ezer kilométeres sebességgel halad vákuumban. Ezzel szemben az elektronnak és pozitronnak van tömege, töltése, mágneses nyomatéka, és nyugalmi állapotban is lehet. Ez jól példázza, hogy a kvantumelméletben ténylegesen valami egészen „új” jött létre.

Minden egyes megfigyelés kölcsönhatással jár, mert valamit látni, hallani, „tapasztalni” kell. Ez az objektum és a megfigyelő közötti energiacsere is jelent. A klasszikus fizika azt az ideális helyzetet veszi alapul, hogy minden egyes kölcsönhatás „tetszőlegesen” kicsivé tehető, vagyis a megfigyelés „elvileg” a megfigyelt dolgot nem befolyásolja. A hatáskvantum véges nagyságának a következménye azonban éppen az, hogy ez az idealizálás nem érvényes többé, azaz a megfigyelő a képződő új egész alkotórészévé válik. A klasszikus fizika elkülöníthető megfigyelője (*detached observer*) nincs többé. Ezért beszél Bohr arról, hogy az élet drámájában nem pusztán nézők, hanem szereplők is vagyunk.¹³

Ha a mérés során kialakult egész ismét tönkremegy, a mérési folyamat befejeződik és létrehoz egy tényt. Ezeknek a tényeknek a további leírása már a klasszikus logika és fizika területére tartozik, vagyis ezek alkalmazásáról nem mondhatunk le. A mérés során keletkező tény azonban természettörvényi szempontból csak bizonyos valószínűséggel rögzíthető, tehát az egyedi eset szempontjából nem eleve meghatározott, nem determinált. Sok fizikus ezt a körülményt ma is nagyon bosszantónak véli, minthogy a klasszikus fizika determinizmusán nevelkedett, azt tette magácvá, a „váltak nélküli sínek” elgondolásával sajátította el tudományát. Miként *Feynman* fogalmaz, a jelenlegi elképzelést a természetmegértés korábbi ideáljának korlátozásaként élik meg, szükségszerű rossznak, visszalépésnek tekintik.

Ugyanakkor kétségtelen, hogy a klasszikus fizika szabályai szerint az atomok, molekulák, s ezáltal a folyadékok, szilárdtestek, gázok nem lennének stabil képződmények, önmagukat pusztítanák el sugárzás révén. Csak a kvantumelmélet tudja biztosítani a stabil állapotokat. Ilyen módon minden világban fellelhető dolognak – a csillagoknak és bolygóknak, kőzeteknek és víznek, növényeknek és állatoknak – a léte csak a kvantumok segítségével fogható fel. Ez érvényes saját biológiai létezésünkre is. Éppen ezért érezzük fontosnak világképünk számára ennek a mind jobb megértését.

3. Kvantumos kísérletek

Az utóbbi egy-két évtized technikai fejlődése lehetővé tette, hogy azok a zömében „gondolatkísérletek”, amelyeket a kvantumelmélet

13 Vö. HEISENBERG, WERNER: *A rész és az egész*. Beszélgetések az atomfizikáról, Budapest, Gondolat, 1978, 2.kiad., 338.

születése környékén kitaláltak, ma már konkrét kísérletekben is ellenőrizhetők. Az alábbiakban négy olyan kísérletről számolunk be, amelyek ugyancsak ezt a célt szolgálják – no, meg talán bizonyos jövőbeli alkalmazási lehetőséggel is kecsegtetnek.

3.1. „Schrödinger kismacskái szépen fejlődnek”¹⁴

Nem, szó sincs valamiféle különleges biológiai, esetleg mezőgazdasági csodáról. Az osztrák fizikus Erwin Schrödinger nemcsak a róla elnevezett kvantumelméleti alapegyenlettel járult hozzá a kvantumelmülethez, hanem egy híressé vált gondolatkísérlettel is. Ez utóbbi célja az volt, hogy a kvantumelmélet abszurdnak látszó következményeire felhívja a figyelmet. A tulajdonképpeni kérdés az, hogy miért képesek a kvantumvilág szereplői (elsősorban részecskék) egyidejűleg több állapotot is felvenni (szaknyelven „kevert állapotba, tiszta állapotok szuperpozíciójába” jutni), míg ugyanerre látszólag makroszkopikus testek nem képesek. Egy macska nem lehet egyidejűleg élő és halott. Schrödinger gondolatkísérletében ez mégis lehetséges, ha az állat életét egy radioaktív készítménytől tesszük függővé. A macska egy mérget tartalmazó ampullával együtt be van zárva egy dobozba. Amikor a radioaktív bomlás végbemegy, az ampulla mérges tartalma rögtön megöli a macskát. A kvantumfizika törvényszerűségei alapján nem lehet megállapítani, hogy a bomlás ténylegesen megtörtént-e vagy sem. A szuperpozíció elvének megfelelően a két állapot – a bomlás előtti és utáni – egy „kevert” állapot formájában lép fel. Az atom radioaktív bomlására jellemző felezési idejét követően 50 %-os valószínűséggel az állat él, és ugyancsak 50 %-os valószínűséggel az állat halott. Mindaddig, amíg a dobozt nem nyitjuk fel, nem derül ki, hogy melyik lehetőség „választódott ki”.

Tulajdonképpen Schrödinger kísérletével arra szeretett volna annak idején (1930-as évek) utalni, hogy a kvantumfizika nem lehet a végső helyes elmélet. Néhány éve a kutatóknak azonban sikerült aprócska modelleken – úgynevezett „Schrödinger kismacskák” – olyan rafinált kísérleteket végezni, amelyeken az említett szuperpozíciós állapot létrehozható, s mi több, meg is figyelhető, ami a klasszikus fizika számára lehetetlen.¹⁵

14 Vö. az alábbi beszámolókkal: *Nature*, 406. kötet 43.; *Science*, 290. kötet 773. *Spektrum der Wissenschaft* (A *Scientific American* német kiadása), 2000. november, 13–14.; *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 2000. november 29., N1–2.

15 Vö. YAM, PHILIP: „Das zähe Leben von Schrödingers Katze”, *Spektrum der Wissenschaft*, 1997. november, 56.

Az eddigi kísérletek olyan objektumokra korlátozódtak, amelyek még mikroszkóppal sem figyelhetők meg, például egyetlen lézerhűtött atomra, amelyet egyidejűleg két különböző rezgésre gerjesztettek.¹⁶

A legújabb kísérletekben sikerült több milliárd elektrontól álló kvantum-rendszerben a klasszikus módon egymást kizáró állapotok szuperpozícióját létrehozni. Ezzel a makroszkopikus Schrödinger macskához lényegesen közelebb kerültünk. A New York-i Állami Egyetemen *Jonathan R. Friedman* kutatócsoportjának, valamint a Delfti Műszaki Egyetem kutatóinak sikerült a megvalósítás.¹⁷

Szupravezető anyagból készült gyűrűben külső mágneses mező segítségével ellenállásmentes áramokat hoznak létre. Ezeket egyébként rendkívül gyenge mágneses mezők mérésére szokás használni. Ebben az esetben viszont az áramkört kevert állapotba hozzák, vagyis a gyűrűben egyidejűleg folyik balra és jobbra az áram. Ez klasszikus értelemben nemcsak ellentmondásos, hanem fizikailag lehetetlen. Ugyanis a jobbra folyó „Squid”-állapotot egy energiagát választja el tükörképétől. Ennek az akadálnak a leküzdése érdekében a kezdetben egy irányban folyó áram mikrohullámú besugárzás révén nagyon kis energiát kap. Ez klasszikus esetben még nem lenne elegendő az energiagát leküzdéséhez. A kvantumelméletben viszont az ún. „alagút-effektus” ezt lehetővé teszi. Következésképpen létrejön a klasszikusan egymással összeegyeztethetetlen két állapot keveréke, zavartalan szuperpozíciója: az áramkörben az áram egyidejűleg folyik jobbra és balra. Természetesen ez az állapot csak addig marad fenn, amíg a kísérlet végrehajtóinak sikerül a rendszernek a környezettel való kölcsönhatását megakadályozniuk.

A probléma most már az, hogyan lehet ezt a paradox állapotot kimutatni. Minden egyes mérés ugyanis a környezettel való kölcsönhatást eredményez. A trükk ebben az esetben az, hogy a kísérletet egy kicsit módosított mikrohullám-frekvenciával megismétlik, és egy második „Squid” segítségével a körben folyó áramokat az általuk létrehozott mágneses mezők mérésével meglepően nagy pontossággal meghatározzák. Az energiagátnak ilyen folytonos letapogatása révén egy jellegzetes energiaugrás mutatkozik, amely egyértelműen utal a két áramirány közötti gát „átalagútasására”. Ezzel a kevert állapot megléte indirekt módon bizonyítottá vált. Ez az eddig kísérletileg megvalósított „legnagyobb Schrödinger macska”.

Az eredmény azt is mutatja, hogy a kvantum-világról a klasszikus világra való átmenet nem annyira attól függ, hogy mekkora, milyen nagyságrendű a rendszer (a fent leírt esetben több milliárd elektrontól áll), hanem sokkal inkább attól, hogy mennyire jól lehet elszigetelni a környezetétől. Egy kvantum szuperpozíció annál gyorsabban lerom-

16 Vö. *Spektrum der Wissenschaft*, 1996. augusztus, 24., valamint *Mérleg*, 1996/3. 252–253.

17 Vö. *Nature*, 406. kötet, 43., illetve *Science*, 290. kötet, 773.

lik, minél erősebb a kölcsönhatása a világ többi részével. Egy macska nagyságú élőlény nem azért lesz bizonyos idő után élő vagy halott – és nem mindkettő egyszerre –, mert kvantumrendszernek túlságosan nagy, hanem azért, mert az élőlények környezetükkel állandó „kölcsönhatásban” állnak.

A gyakorlati alkalmazások tekintetében a „Squid-kísérlet” fontos lehet a kvantum-számítógépek kifejlesztésében. Előnye abban állna, hogy kevert állapotok segítségével olyan feladatok is megoldhatóvá válhatnának, amelyek a klasszikus számítógépekkel lehetetlenek.

3.2. „Kísérteties távolbahatás”

Miként utaltunk rá, Einstein soha sem volt elégedett azzal, amit a kvantumelmélet teljesíteni tudott. Talán leghíresebb ellenvetése az ún. EPR-paradoxonnal¹⁸ fogalmazódott meg. Az Einstein, Podolsky és Rosen (innen az elnevezés) által közzétett gondolat-kísérletet itt egy egyszerű példával kívánjuk szemléltetni. Kétten érmével játszanak. Mint közismert, ötven százalékos valószínűséggel egymástól függetlenül az eredmény „fej”, illetve ugyanakkora valószínűséggel „írás”. A kvantumelmélet szerint viszont a két érme olyan rendkívüli állapotba hozható, hogy az egymástól függetlenül dobó két személy mindig ugyanazt az eredményt kapja: ha az egyiknél fej adódik, akkor a másiknál is. A két eredmény összehasonlítása nagy számú ismétlés esetén tökéletes egyezést mutatna, függetlenül attól, hogy hol van a két személy: a köztük lévő távolság tetszőlegesen nagy lehet, az egyik lehet Budapesten, míg a másik valahol Tokióban van.

Az ún. EPR-kísérlet (paradoxon) tulajdonképpen a fenti példa, az atomi világban valóban így zajlik. Két, azonos forrásból származó foton (a fény elemi részecskéi) egymással ellentétes irányban repül. Két, egymástól elválasztott helyen megméri a fotonok polarizációját. A kvantumelmélet szerint a fotonok rezgési iránya (polarizációja) mérés előtt határozatlan. Az egyik fotonon elvégzett mérés nyomán azonban a másik mérés eredménye is egyértelműen meghatározott lesz. Az a látszat, mintha a fotonok hirtelen, pillanatszerű, „nem lokális” kölcsönhatásban vennének részt, amely polarizációs állapotukat rögzíti. A tudósok a rendszer mint összefüggő egész kvantummechanikai hullámfüggvényének a „redukciójáról”, „összeomlásáról” (*kollaps*) beszélnek. Ez a kép nem illett Einstein és társai elképzelései közé. Már csak azért sem, mert a relativitáselmélet szerint a hatás és ok lokálisan, helyileg egymáshoz kapcsolódik, a jelek pedig legfeljebb vákuumbeli fénysebességgel terjedhetnek. Érvelésük szerint a kvantumfizika nem tekinthető teljesnek, mert a fotonok polarizációs állapota nem jelezhető előre.

18 Vö. *Mérleg*, 1996/3. 250–251., illetve az ott felsorolt irodalommal.

Az EPR-tanulmány (1935) megjelenése óta filozófusok és fizikusok sokasága igyekezett a kvantumelméletet ún. „rejtett paraméterek” felvételével lokális elméletté változtatni.¹⁹ A vita első hallásra meglehetősen „akadémikusnak” tűnik, valójában azonban alapvető a kvantumelmélet érvényessége szempontjából. A hatvanas években *John Bell* nek sikerült megmutatni, hogy a rejtett paraméteres elméletekkel végzett számításoknak és a kvantumelméletnek különböző, kísérletileg is igazolható eredményekre kell vezetniük.²⁰ Az első ilyen jellegű kísérleteket az 1980-as évek elején végezték. A genfi egyetemen *Nicolas Gisin* és kutatócsoportja a kvantumhipotézis 100. születésnapjára mutatták be azt a kísérletet, amely 10 km-es távolságból mutatta ki a kvantumelmélet által előre jelzett „kísérteties távolbahatást”.²¹ A genfi kutatók frekvencia-duplázó nemlineáris kristály segítségével egy kvantummechanikailag csatolt foton-párt hoztak létre. A két foton üvegszálon a Genftől 5–5 km-nyire lévő Bernex-be, illetve Bellevue-be küldték. A két helység közti távolság tehát 10 km. Itt mérték a fotonok polarizációját. A mérési eredmények összevetése a kvantummechanika előrejelzését erősítette meg. A fotonok – a példánkban felhozott érmékhez hasonlóan – nagyon erős korrelációt mutattak. Ugyanakkor kizárható, hogy a polarizáció a kezdet kezdetétől ismert lett volna, csakis a mérés nyomán vált egyértelműen meghatározottá. A két alkalmazott üvegszál 2 mm-nyi pontossággal azonos hosszúságú volt, vagyis a fotonok közel egyidejűleg érkeztek a detektorokhoz. Ha az egyik mérés lenne a másikra hatással, miként a rejtett paraméteres elméletek többsége feltételezi, akkor ez a hatás a fénysebességnél tízmilliószor lenne nagyobb.

A Gisin-féle kísérletek azonban a rejtett paraméteres elméletek számára még nem jelentik a „kegyelemdőfést”. Többen arra utalnak, hogy a mérés csak minden tizedik fotonpár esetén járt – a kvantumelméletet megerősítő – sikerrel. A tudósok egy része ún. „búvólyukakra” hivatkozik. Ezek a fotonokat detektáló eszközök érzékenységevel kapcsolatosak. Valóban csak minden tizedik foton sikerült kimutatni. Ezeket a búvólyukakat *Dave Wineland* igyekezett munkatársaival a Colorado állambeli a National Institute of Standards and Technologyban „betömní”. Az amerikai kutatók EPR-kísérletükben két, néhány mikrométer távolságra lévő ún. „Pál-csapdában” elszigetelt ior nal dolgoztak. Ezeket gerjesztették lézerefény segítségével megfelelő kevert állapotba. Méréseik szintén a kvantumelmélet előrejelzéseit erő-

19 Ennek a vállalkozásnak az egykori Szovjetunióban és a hozzá rendelt országokban ideológiai jellege is volt. Vö. tk. DAVID BOHM: *Okság és véletlenség a modern fizikában*, Budapest, Gondolat, (Stúdium könyvek), Bp., 1960. Utószava *Tyerleckijtől* származik, ahol ez áll: „...Bohm valójában a dialektikus materializmus filozófiájának bizonyos alaptételeit fejti ki...”

20 Vö. BALOGH, V. SZ.: „A kimondható és kimondhatatlan a kvantumelméletben”. *Mérleg*, 1992/2. 211–213.

21 Vö. a teleportációról szóló beszámolókkal, *Mérleg*, 1998/2. 127.

sítik. A Gisin-féle kísérletekkel ellentétben ennek az elrendezésnek az előnye abban rejlik, hogy az impulzusnyomaték közel százszázalékos pontossággal határozható meg. Ilyen módon a kísérlet-sorozat egyetlen eseménye sem megy veszendőbe.

A Wineland és Gisin által végrehajtott kísérletek egy másik „búvólyukat” nyitva hagynak. Az egyik rejtett paraméteres elmélet szerint előfordulhat, hogy egy „vezérhullám” („vezérmező”) úgy kormányozza szóban forgó csatolt fotonokat, hogy azok a kvantumelméletnek megfelelő előrejelzés szerint érkeznek a detektorokhoz. A százéves jubileum tiszteletére tartott szimpóziumon A. Zeilinger olyan kísérletekről számolt be előadásában,²² amelyekben a polarizációs mérőműszer véletlenszerű forgásával kizárták a „vezérhullám” irányító lehetőségét.

Mindennek ellenére hiányzik még az a végleges kísérlet, amely az eddigi összes kísérleti elrendezés pozitív vonásait egyesítené.

3.3. „Fotonok a semmiből”

A fény és a vele kapcsolatos jelenségek régtől fogva ismertek és jól kutatott területnek számítanak. 1905-től kezdődően tudjuk, hogy szintén kvantumokban, fotonok formájában sugárzódik ki. A fénykibocsátás azonban nagymértékben a véletlentől függ. *Gerhard Rempe*²³ a garchingi Max Planck Intézet kvantumoptika kutatórészlegében rubidiumatomokat olyan módon készített elő, hogy azok ne spontán módon bocsássanak ki fotonokat, hanem egyfajta ellenőrizhetőséget valósíthassanak meg. Miként a csoport vezetője maga a kvantumelmélet százéves jubileumára rendezett berlini szimpóziumon beszámolt róla, az atomok nem hirtelen mennek át egyik állapotból a másikba, hanem „adiabatikusan”, azaz egészen fokozatosan.²⁴ A kutatók két, egymással szemben függőlegesen álló tükör közé lefelé „szitálták” be az atomokat. A két tükör közti üreg fekvő henger alakú volt, amely csak meghatározott hullámhosszú és mozgási irányú állóhullámok felvételére alkalmas.

Mínél jobban közeledtek a kezdetben még fotonmentes üregben eső atomok a tengelyhez, annál jobban „éreztek”, milyen fotonok felvétele lehetséges, és ennek megfelelően „igazították” kvantummechanikai állapotukat környezetükhöz. Az „üreg-fotonok” keletkezéséhez kívülről bevezetett energiára van szükség. Oldalról ezt egy lézersugár segítségével biztosították. Mégpedig úgy, hogy a sugár közvetlenül a tengely alatt legyen, vagyis olyan helyen, ahol az üreges tér hatása már kissé kisebb. Közvetlenül persze ez még sem a fotonok létrehozására, sem pedig az atomok gerjesztésére nem alkalmas. Viszont a lézerefény és az „üreg-fotonok” hullámhossza úgy volt egymásra ráhangolva,

22 Vö. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 2000. december 20., N3

23 Vö. *Mérleg*, 1999/3. 328.

24 *Physical Review Letters*, 85. kötet, 4872.

hogy mind az üreges tér, mind pedig az atomok a lézer befolyását érzékelték. Miközben az atomok mintegy 2 m/s sebességgel estek át az üregen és a lézersugáron, elegendő idejük volt ahhoz, hogy kvantumállapotukat a külső adottságokhoz igazítsák. Ez által az üreges tér is megváltoztatta állapotát és mindannyiszor, amikor egy atom átesett, a „semmiből” foton keletkezett.

A két határoló tükör egyike részint áteresztő volt, így vízszintes irányban fotonok távozhattak, amelyek állapota meghatározható lett. A mérések szerint valamennyi foton a tengellyel párhuzamosan mozgott ide-oda. A kutatók pillanatnyilag olyan kísérlet előkészítésén dolgoznak, amikor egy előre meghatározott időpontban egyetlen atom egyetlen lézerimpulzus segítségével egyetlen, előre meghatározott tulajdonságú foton állít elő az üregben.

A számítások azt mutatják, hogy az ilyen módon előállított fotonok kvantuminformációk továbbítására alkalmasak. Ehhez „pusztán” az szükséges, hogy a rubidiumatom előkészítésekor két kvantumállapot meghatározott keverékébe kerüljön, amely éppen ezt a kvantuminformációt reprezentálja. Amikor az atom az üregben „találkozik” a lézersugárral, foton ad le, amely szintén ebben a keverékállapotban van. Ha ez a foton kilép az üregből és bizonyos távolságra találkozik egy másik rubidiumatommal, akkor ezt az atomot ugyanabba az állapotba gerjeszti, amelyben az első volt. Ezzel a kvantuminformáció továbbítása lezárult. A kísérlet a fény különleges természetét, valamint a kvantummechanika ismert szabályainak érvényességét erősíti meg, ugyanakkor egy rendkívüli jelentőségű alkalmazásra is rámutat.

3.4. Egzotikus gázok – mélyhűtve

A kvantumos jelenségek nemcsak egyedi atomokon és fotonokon tanulmányozhatók, hanem makroszkopikus testeken is. Megfelelő hűtés mellett ugyanis ezek olyan tulajdonságokat mutatnak, amelyek csak a kvantumelmélet segítségével magyarázhatóak. A legtöbb fém például az abszolút zérus fok (mínusz 273 Celsius fok) közelében szupravezetővé válik: ellenállás nélkül vezeti az elektromos áramot. A folyadékok is rendkívüli tulajdonságokat mutatnak alacsony hőmérsékleten. Például a folyékony hélium két Kelvin fok körül sűrűdásmentesen folyik. Néhány esztendő óta a gázok is olyan kvantumállapotba hozhatók alacsony hőmérsékleten, amikor hasonló tulajdonságokat mutatnak. Hogy ezeknek az ún. Bose–Einstein kondenzátumoknak a területén milyen jellegű újabb eredmények születtek, arról ismét csak a korábban már említett berlini szimpóziumon adtak számot a terület szakemberei.

A Bose–Einstein kondenzátumokra már 1925-ben A. Einstein hívta fel a figyelmet. Ekkor a kvantumelmélet teljes apparátusa még nem állt rendelkezésre, de már *Louis de Broglie* nyomán ismert volt, hogy az atomok nem csak részecskeként, hanem bizonyos szituációkban hul-

lámként viselkednek. Amikor a gázok atomjai annyira közel kerülnek egymáshoz a hűtés során, hogy atomjaik egymás közti távolsága az ún. de Broglie-hullámhossz nagyságrendjébe esik, akkor az állapotukat leíró hullámfüggvények „egymásba nyúlnak”. Amennyiben ezek a részecskék azonos bozonok (egész számú spinnel – saját-impulzusnyomatékkal) rendelkező részecskék, akkor nem különböztethetők meg egymástól. Egyetlen makroszkopikus kvantumállapottá „olvadnak”. Valamennyi atom a de Broglie-hullámhosszon „elmázolva” ugyanazon a helyen található. Ennek a „szuperatom”-nak az állapota egyetlen hullámfüggvénnyel írható le.

Öt évvel ezelőtt *Eric Cornell* és *Carl Wiemann* (National Institute of Technology in Boulder/Colorado) hozott létre laboratóriumi körülmények között ilyen „szuperfolyékony” Bose–Einstein kondenzátumot. Rafinált lézerhűtési módszerrel és mágneses atomcsapdákkal sikerült egy több ezer rubidiumatomból álló gázt az abszolút nulla fok fölött kevesebb, mint egy milliomod fokra hűteni. Az elmúlt években a nátrium, lítium és hidrogén kvantumgázának előállítására is megvalósult. Míg az első kísérletekben pusztán ezres nagyságrendű volt a lehűtött atomok száma, addig a mostaniakban ez már néhány milliárdos, amelynek nagysága is több mikrométernyi.

Hogy a „kvantumfelhő” atomjai valóban ugyanabban a kvantumállapotban vannak, annak kimutatására két ilyen ultrahideg atomfelhő szuperpozícióját hozzák létre. Ilyenkor tipikus interferenciakép keletkezik, miként az a kétréses kísérletből ismeretes. Az utóbbi időben a szuperfolyékonyág örvényes jellemzői álltak a megfigyelések homlokerében. Cornelnak és Wiemannak sikerült áramlási örvényt szuperfolyékony héliumban létrehozni. Ez további energia hozzáadása nélkül tetszőleges ideig fennmarad. A technikai részletek mellőzésével itt csak annyit jelzünk, hogy ez a kísérlet újabb megerősítése annak, amit a kvantumelmélet jósolt.

4. Zárszó helyett kitekintés

Talán sokakat meglep, hogy ekkora teret szántunk ennek a látszólag szakfizikusokat érintő területnek. Szabadjon azonban e helyütt ismételtelen a bevezetőnkben már említett értékelésre utalnunk: a kvantumelmélet sikere újszerű filozófiai megfontolások kidolgozását teszi szükségessé. Ebben alapvető szerepe van annak, hogy milyen viszonyban van a rész az egésszel, hogy mi tekintendő egésznek, egynek, egységnek. S talán a legfőbb tanulság, amely sok más – filozófiai megalapozást váró – teológiai, erkölcsi, stb. kérdés megoldása során is mértékadó lehet: *Az egész sohasem a részek összege.* Az egészre figyelő, arra reflektáló, de az akarva-akaratlanul részekkel is bizonyos helyzetekben beérő emberi természetünk szereplői volta csak a helyes nézet (szcmlélet) nyomán valósítható meg.