

Magyar Tudomány

A Magyar Tudományos Akadémia folyóirata. Alapítva: 1840

KEZDŐLAP ARCHÍVUM IMPRESSZUM KERESÉS

» MUNKÁRA FOGOTT KVANTUMMECHANIKA

X

Domokos Péter

az MTA levelező tagja, tudományos tanácsadó,
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtest-fizikai és Optikai Intézet
domokos.peter(kukac)wigner.mta.hu

A 2012. évi fizikai Nobel-díjat a francia Serge Haroche és az egyesült államokbeli David Wineland kapták kísérleti fizikai módszereikért, amelyekkel áttörést értek el egyedi kvantumrendszerek mérésében és manipulálásában. Kísérleteikben a kvantummechanika egyes alapvető tételeit igazolták. Meglepő, hogy erre hét évtizedet kellett várni, miközben a 20. században a modern fizika kvantumelméletből kiinduló diadalmenetének lehettünk tanúi. A következőkben megpróbáljuk pontosabban meghatározni, hogy milyen nehézségeket kellett legyőzni az egyedi kvantumobjektumokkal való kísérletezéshez, és most, az áttörést hozó módszerekkel milyen új továbblépési irányok nyílnak meg.

Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr és Louis de Broglie heurisztikus ötletei nyomán született meg a kvantummechanika, amelynek szigorú elméleti alapjait néhány 1925–26-ban megjelent publikációban, elsősorban Werner Heisenberg és Erwin Schrödinger fektették le (Heisenberg, 1925; Born – Jordan, 1925; Born et al., 1925; Schrödinger, 1926). Ezt követően döbbenetes gyorsasággal, néhány év leforgása alatt kibontakozott az az elmélet, amely máig meghatározta a modern fizika fő irányait. A gyökeresen új fogalomrendszer alapján kialakult az atom-, molekula- és szilárdtestfizika, illetve nagy energiákon a részecske- és magfizika. Ezzel együtt a mindennapi életünket meghatározó eszközök sokasága fejlődött ki, amelyek működésének alapos megértése csak a kvantumelmélet alapján lehetséges. A korai időszakból nagy jelentőségű példát szolgáltatnak a szabályozott maghasadáson alapuló nukleáris erőművek. A nukleáris technológia későbbi, immár orvosi alkalmazása a pozitronemissziós tomográf. Az atomfizikának köszönhetjük a lézereket, illetve a szilárdtestfizika termékei a megapixeles CCD-kamerák és a LED-es égők. A modern fizikában járatosabbak kedvéért érdemes felidézni,

tudták. Ezeket a folyamatokat kvantumállapot-tervezésnek nevezzük, ami mutatja, hogy itt lényegében már a „kvantummérnöki” tudomány területére lépünk és alkalmazzuk a kvantummechanikát: nemcsak a természet által felajánlott állapotokkal foglalkozunk, hanem önkényesen állítunk elő különleges, maguktól nem létező állapotokat.

A jól kontrollált kísérleti rendszerek lehetővé tették a makroszkopikus világban kialakult intuitív képünknek ellentmondó jelenségek vizsgálatát. Kvantitatív módon meg lehetett mérni a környezeti kölcsönhatások romboló hatását egyes kvantumjelenségekre. Kiderült, hogy az interferencia túlérzékeny: a rendszer energiájának a környezetbe szivárgására jellemző időnél sokkal rövidebb idő alatt tűnik el két különböző állapot koherens szuperpozíciója. Az „itt vagyok” és „ott vagyok” szuperpozíciós állapot nagyon gyorsan átalakul az „itt vagyok” vagy „ott vagyok” állapotok valószínűségi keverékébe. Ez jóval hamarabb bekövetkezik, mint az, hogy az „itt” és „ott” állapotok maguk is elbomlanának, és végső soron az oszcillátor a kezdeti állapotától teljesen függetlenül a nyugalmi állapotába kerül. Az interferenciaképességnek ezt a váratlanul gyors eltűnését dekoherenciának nevezzük, és demonstrálták az ioncsapdás (Monroe et al., 1996) és a rezonátoros kísérletekben is (Brune et al., 1996).

Az ionoknál az interferáló állapotok szó szerint az ion két különböző helyének felelnek meg a csapdában (harmonikus rezgőmozgásnál egyébként ez a mozgás két különböző fázisa). A rezonátorban a mikrohullámú mező klasszikus mikrohullámú forrással keltett egyszerű állapotát vesszük két különböző fázissal, tehát matematikai szinten szoros analógia van a kétféle megvalósítás között. Mindkét kísérleti megközelítésben sikerült letapogatni a fent leírt dekoherenciát. Pontosan kimérték az interferencia eltűnésének gyorsasága és az interferáló

hogy nagyobbfajta NMR-eszközökben szupravezető mágnessel keltik a mágneses teret, a keletkező spinrezonancia-jelet feldolgozó tomografikus képalkotáshoz, a kiértékeléshez pedig a félvezető-fizikán alapuló számítógépeket használnak. Ezek a modern szilárdtestfizika egyetemi tananyagba épült prominens fogalmai.

A széles körű alkalmazhatóság és a sikeresen kifejlesztett eszközök persze már régóta elfogadtatták velünk a kvantummechanika elméletét. Maradt azonban egy sajátos, nyugtalanító hiányosság, amely a fizika korábbi elméleteire nem volt jellemző. Éppen az alapvető jelenségek ellenőrzésére kigondolt legegyszerűbb kísérleti sémákat nem lehetett a gyakorlatban megvalósítani! Megmaradtak gondolat-kísérletnek (Gedankenexperiment), amelyet nyelvi eszközként használhatunk a kvantumelmélet nagyon absztrakt matematikai leírásának kikerülésére. Sőt megkérdőjeleződött, hogy egyáltalán elvileg lehet-e közvetlenül a kvantummechanika világának fundamentális objektumain méréseket végezni. Erwin Schrödinger, a kvantummechanika egyik alapító atyja még 1952-ben is úgy vélekedett, hogy „soha nem kísérletezünk pontosan egy elektronnal, egy atommal vagy egy kis molekulával. Gondolat-kísérletekben megtesszük ezt persze, de ennek nevetséges következményei lennének” (Schrödinger, 1952). Elfogadhatatlan volt ugyanis, hogy egyetlen kvantumos objektum, illetve a makroszkopikus világban élő kísérletező és annak műszerei közötti lényegi szakadékot mérésekkel áthidalhassuk: például a kvantumos részecske lehet egyszerre két különböző helyen, de egy általunk leolvasható műszer mutatója nem mutathat egyidejűleg két különböző irányba.¹

Ami elvi szempontból könnyen megemészthető, és gyakorlatban is megvalósítható mérés volt, azokat mindig sokaságon végezték el. Például sok-sok azonos atomból vagy elektrontól álló nyalábon vagy egy darab kristályon. Ezekből a mérésekből az anyag szerkezetének és az elektromágneses mezőnek a sokaság átlagos viselkedésére jellemző tulajdonságait lehetett kiolvasni. Az anyag és a fény elemi építőköveinek (atom és foton) jellemzőiről így viszont csak korlátozottan juthattunk információkhoz. Bármelyik atom folyamatosan, sokféle kölcsönhatásban vesz részt a környezetével, amelyek torzítják, vagy teljesen eltakarják a csupasz „arcát”. Egy kiválasztott atom ütközik a többi atommal, illetve egy kristályban bármely rész mindenféle kölcsönhatásban vesz részt a kristályban lévő elektronokkal, magokkal és rácsrezgésekkel.

Tegyük ehhez hozzá, hogy még ha lenne is egy különálló atomunk, mivel nincs tökéletes vákuum,

állapotok megkülönböztethetősége közötti, az elmélet által megjósolt kapcsolatot. 1996-ban a párizsiak lélegzetelállító szépségű kísérleteiben időfelbontásban, mozifilmszerűen mutatták be a két különböző fázisú mező közötti interferencia eltűnését (Deléglise et al., 2008). Ezek a kísérletek a dekoherencia tesztelése mellett beazonosították azt a határt, amelyen belül tényleg a kvantumvilág törvényei uralkodnak. De akkor mit is kezdhetünk ezzel a világgal?

Általánosan elterjedt nézet, hogy a kvantummechanika csodája a részecskék hullámszerű viselkedéséhez és az abból fakadó interferenciához kötődik. Richard P. Feynman, a nagyszerű (és ugyancsak Nobel-díjas) amerikai elméleti fizikus úgy fogalmazott egyszer, hogy „az interferencia a kvantummechanika szíve, és valójában ez az egyetlen misztérium”. Ha a kvantummechanikát használni szeretnénk, akkor viszont érdemes ennél mélyebbre ásunk a titokzatos kvantumvilágban.

Amikor egyetlen részecske helyett (legalább) két részecskéből álló rendszert vizsgálunk, akkor lényegileg új jelenségekkel találkozunk. Mára világossá vált, hogy ekkor óriási lépést teszünk a kvantummechanika alkalmazhatósága felé is. Egyébként abba, hogy az anyagi részecskék hullámszerűen viselkednek, végső soron bele lehet törődni, ráadásul hullámokkal és interferenciával a klasszikus fizikában is találkozunk (rugalmas kötélen, vízfelszínen, vagy akár az elektromágneses sugárzásban). Viszont a kétrészecskés rendszerek állapotterében a szuperpozíció elve olyan furcsaságokat okoz, amelyek a klasszikus fizika alapján ténylegesen értelmezhetetlenek és elfogadhatatlanok. Einstein, Boris Podolski és Nathan Rosen (1935) mára híressé vált (az első évtizedekben csak egy-két hivatkozást kapott) cikkükben olyan kétrészecskés állapot léteire mutattak rá, amelyet lehetetlenségnek tartottak, és ami a kvantumelmélet kritizálásának alapjául szolgált. Később John Bell, aki részecskefizikusi munkája mellett „hobbiként” foglalkozott a kvantumelmélet alapjait érintő problémákkal, matematikai formába öntötte azt, hogy a bizonyos kétrészecskés állapotokban a két részrendszeren végzett mérések eredményei olyan statisztikus korrelációt mutathatnak, amely a klasszikus valószínűségi eloszlásokkal nem írható le (Bell, 1964). Ezek az ún. összefonódott állapotok, amelyekben a részecskék külön-külön nincs identitásuk, csak együtt, a teljes rendszer állapota írható le pontosan. Bár létük régóta ismert (az elnevezés Schrödingertől származik), a gyakorlatban nehéz volt ilyen állapotokat előállítani. A mai fizikában az összefonódott állapotok olyan fontosak, hogy a 90-es években külön tudományág született

az is állandóan ütközne a háttérben lévő atomokkal, molekulákkal. Hasonlóképpen nem lehet megszabadulni az elektromágneses mezőben jelen lévő feketetest-sugárzás termikus fotonjaitól, illetve minden objektumot folyamatosan zaklatnak a kozmikus sugárzás nagyenergiás részecskéi is. Ezek mind-mind kontrollálatlan kölcsönhatások, amelyek lényeges kvantumos sajátosságok eltűnéséhez vezetnek. Mint arra majd visszatérünk ebben a cikkben, a kvantummechanikai alapkísérletek az elméleti várakozást megerősítve megmutatták, hogy akár még gyenge környezeti hatások miatt a kvantuminterferencia is eltűnik. A részecskék ezért nem lehetnek tartósan két különböző helyen egyidejűleg, hanem vagy az egyik, vagy a másik helyen lokalizálódnak.

Wineland és Haroche egyetlen atommal, ionnal, illetve fotonnal ténylegesen egyedi kvantumrendszereken végeztek kvantummechanikai alapkísérleteket az 1980-as évek közepétől kezdődően. Ezekhez tehát ki kellett „csípni” egyedi objektumokat egy sokaságból, majd ezeket el kellett szigetelni a környezeti hatásoktól. Érdemes felidézni, hogy Haroche doktori témavezetője Claude Cohen-Tannoudji is részesült Nobel-díjban (1997-ben, a lézeres hűtés és csapdázás módszereiért, amelyekkel atomok tömegközépponti mozgásában lévő hőmérsékleti zajt lehet csökkenteni, illetve atomokat tudatosan mozgatni lézerekkel), sőt még korábban az ő témavezetője, Alfred Kastler is (1966-ban az optikai pumpálásért, amellyel atomokat az elektronszerkezetük egy jól meghatározott állapotában lehet preparálni). Hasonlóképpen, pályafutását Wineland is Nobel-díjasokkal kezdte, posztdoktor volt például Hans Dehmelt mellett, akit ionok csapdázásáért díjaztak 1989-ben. Ez is jól mutatja, hogy az idei kitüntetettek „áttörést” hozó kísérletei valójában egy tudatos, több évtizeden átívelő munka eredményeképpen jöttek létre. Kialakult a kvantumoptika, a fény–anyag-kölcsönhatás fundamentális szinten történő vizsgálatának szentelt kutatási terület.

A környezeti hatásoktól való minél jobb elszigetelés szükséges, azonban nem lett volna elégséges az áttörést jelentő kísérletek végrehajtásához. Haroche és Wineland abban jártak az élen, hogy képesek voltak az izolált kvantumrendszerek között kontrollált kölcsönhatást kialakítani. Ötletes módszerekkel olyan erős csatolást hoztak létre, hogy a kvantummechanika törvényei megmutatkoztak a csatolt rendszer dinamikájában, még mielőtt a környezet elpusztította volna a kvantumeffektusokat.

Milyen rendszerekről van szó? Wineland

tárgyalásukra: a kvantuminformatika. Ez a terület a fizika, matematika és számítástudomány határterületén éppen az összefonódott állapotok manipulálásának tudománya. Alkalmazásai a kommunikációban és titkosításban már megjelentek, a metrológiában és a számítástudományban pedig várhatóak.

Ennek fényében világosan látszik annak a jelentősége, hogy a kétféle kvantumoptikai kísérletsorozatban egyaránt kölcsönható kvantumobjektumok manipulálása vált lehetővé. Összefonódott állapotokat preparáltak, majd tervezett módon, az egyik részen végzett lokális műveletekkel és mérésekkel alakították a másik rész állapotát. A hosszú ideig kontrollálható kvantumrendszereken programozott műveleteket hajtottak végre, például logikai kapukat valósítottak meg. Serge Haroche és David Wineland kísérleteikben lerakták a kvantuminformatika alapjait. E sorok íróját örömmel és büszkeséggel tölti el, hogy aktív részese lehetett ennek a munkának még a kibontakozás kezdeti fázisában (Domokos et al., 1995).

A kvantummechanika végre elkezdett szolgálni minket. Nemcsak szemlélői vagyunk a kvantumvilág csodáinak, hanem beavatkozunk, rendszereket és állapotokat tervezünk, amelyek speciális tulajdonságait sokféle alkalmazásban tudjuk kiaknázni. Egyik elsődleges alkalmazás, hogy különböző mennyiségek mérésében a pontosságot nagyságrendekkel meg lehet javítani, ha a szondázó rendszerünk kvantummechanikai összefonódott állapotban van. Ilyen mennyiség például a lokális mágneses tér. Az időmérés standardját definiáló atomórák új generációja is csapdázott, csatolt atomok rendszerén fog alapulni (Chou et al., 2010). Évről évre növekszik a kvantumdinamikai szinten kontrollált rendszerek mérete, amelyekkel egyre nagyobb számítási feladat hatékony, kvantumalgoritmusokkal történő elvégzésére nyílik lehetőség. A jövőbeli kvantumszámítógépek architektúrája lehet, hogy egészen más lesz (bár az ioncsapdák lapra integrált változata az egyik legígéretesebb jelölt, és jelenleg a legtöbb q-bites számítógép is ioncsapdán alapul), azonban az a tudás, amelyet a rezonátoros, illetve az ioncsapdás rendszerekben szereztünk, biztosan szükséges lesz a tényleges számítógép megépítéséhez.

Kulcsszavak: kvantummechanika, kísérletek, interferencia, dekoherencia, összefonódás, rezonátor, ioncsapda

ionokkal (pozitív töltésű atomokkal) kísérletezik nagy vákuumban. A töltött atomokat megfelelően kialakított elektromos térrel csapdázza, azaz egy kisméretű potenciálvölgybe szorítja őket, amelyben harmonikus rezgőmozgást végeznek (tömegközépponti mozgás). Kitalált egy trükkös lézeres gerjesztési sémát, amellyel az ion elektronfelhőjének állapotai között úgy indukál átmeneteket, hogy közben az ion tömegközépponti mozgása is kontrollált módon változik meg. A kölcsönhatás ebben az esetben egyetlen objektum, a töltött atom két különböző szabadsági foka között valósul meg. A belső (az atomhéj elektronállapota) és a külső (az ion tömegközépponti mozgása, amely jó közelítéssel megfelel az atommag translációs mozgásának) szabadsági fokok között a lézeres megvilágítás teremt indirekt módon kapcsolatot. Nagy intenzitású lézerekkel ez a kölcsönhatás felerősödik, és dominál minden egyéb, nem kontrollálható hatást.

Haroche és munkatársai mikrohullámú rezonátort építettek két nagy reflexiójú, egymással szembefordított tükörből. A mező egyetlen fotonja 130 milliszekundum ideig beszorul a tükrök közé. Ezen élettartam alatt az elektromágneses hullám 10 milliárd rezgést végez. Ez jelenleg a legjobb oszcillátor. A tükrök között különleges, ún. cirkuláris Rydberg-állapotban preparált atomokat lönek át, amely állapotban a vegyértékelektron kb. 200 nanométer átmérőjű körpályán mozog az atomtörzs körül. Tehát a méretük ezerszerese egy hidrogénatom méretének, és mintegy piciny antennaként, nagyon erősen csatolódnak a mikrohullámú rezonátorban lévő mezőhöz: szívesen nyelnek el, illetve bocsátanak ki foton. Itt a két kölcsönható szabadsági fok két különböző objektumhoz kötődik, az atom elektronállapotához, illetve a sugárzási mezőnek a rezonátorral meghatározott módusához.

Mindkét kísérleti rendszernek fontos sajátossága, hogy a részek közötti kölcsönhatás mesterséges, ami azt jelenti, hogy paramétereit nem természeti állandók szabják meg, hanem a kísérletező állíthatja be, sőt akár menetközben is hangolhatja őket. Ezzel ő maga tervezi meg a rendszer időfejlődését, természetesen csak azon az időskálán, amíg a rendszerből az energia végleg, irreverzibilisen a környezetbe nem távozik.

A kvantummechanika szerint egy rendszer lehetséges állapotainak halmaza sokkal bővebb, mint a klasszikus fizika szerint. Egy harmonikus oszcillátor, mint amilyen egy ideális rugóra akasztott test vagy a rezonátor egyetlen módusa, klasszikusan a helyével és sebességével, tehát két paraméterrel adható meg. Haroche-ék az alapállapotból kiindulva olyan állapotokba vezérelték a rezonátor módusát, amelyeket már

IRODALOM

- Bell, John S. (1964): On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics*. 1, 195–200. • **WEBCÍM**
- Born, Max – Jordan, Pasqual (1925): Zur Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik*. 34, 858–888.
- Born, Max – Heisenberg, W. – Jordan, P. (1925): Zur Quantenmechanik II. *Zeitschrift für Physik*. 35, 557–615.
- Brune, Michel – Hagley, E. – Dreyer, J. – Maître, X. – Maali, A. – Wunderlich, C. – Raimond, J. M. – Haroche, S. (1996): Observing the Progressive Decoherence of the “Meter” in a Quantum Measurement. *Physical Review Letters*. 77, 24, 4887–4890. DOI: 10.1103/PhysRevLett.77.4887 • **WEBCÍM**
- Deléglise, Samuel – Dotsenko, I. – Sayrin, C. – Bernu, J. – Brune, M. J. – Raimond, M. – Haroche, S. (2008): Reconstruction of Non-classical Cavity Field States with Snapshots of Their Decoherence. *Nature*. 455, 510–514.
- Domokos Péter – Raimond, J. M. – Brune, M. – Haroche S. (1995): Simple Cavity–QED Two-bit Universal Quantum Logic Gate: The Principle and Expected Performances. *Physical Review A*. 52, 3554–3559.
- Einstein, Albert – Podolsky, B. – Rosen, N. (1935): Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Physical Review*. 47, 10, 777–780
- Guerlin, Christine – Bernu, J. – Deléglise, S. – Sayrin, C. – Gleyzes, S. – Kuhr, S. – Brune, M. – Raimond, J. M. – Haroche S. (2007): Progressive Field-state Collapse and Quantum Non-demolition Photon Counting. *Nature*. 448, 889–893. doi:10.1038/nature06057
- Heisenberg, Werner (1925), Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Zeitschrift für Physik*. 33, 879–893.
- Monroe, C. – Meekhof, D. M. – King, B. E. – Wineland D. J. (1996): A Schrödinger Cat Superposition State of an Atom. *Science*. 272, 1131–1136. • **WEBCÍM**
- Schrödinger, Erwin (1926): Quantisierung als Eigenwertproblem. *Annalen der Physik*. 79, 361–377.
- Schrödinger, Erwin (1952): Are There Quantum Jumps? I–II. *British Journal of the Philosophy of Sciences*. 3, 10, 109–123. DOI: 10.1093/bjps/III.10.109, 3, 11, 233–242. DOI: 10.1093/bjps/III.11.233

LÁBJEGYZET

- 1 A kvantumvilág közismert furcsasága a részecske-hullám kettős természet. Egyetlen atom egyszerre több helyen létezhet (szuperpozíció), és ezen lehetőségek interferálnak. Ez a hullámszerű viselkedés, amely a kétréses gondolkísérlésben úgy jelentkezik, hogy a két szeparált forrásból (a két résből) induló hullámok egy távoli ernyő pontjaiba különböző utakon érkeve kioltják vagy erősítik egymást, és jellegzetes interferenciacsíkokat keltenek. Ezzel nehezen összeegyeztethető részecskeszerű képet sugall ugyanakkor az, hogy az ernyőn elhelyezett detektorok közül mindig csak az egyik jelzi az atom ottlétét. Az atomnál sok nagyságrenddel nagyobb, esetleg mikroszkóposan már megfigyelhető méretű testek esetében soha nem tapasztalunk interferenciát, holott a kvantumelmélet szerint ezt elvileg semmi nem zárja ki. Ez a kvantum mérés problémája, amely máig megoldatlan. Azonban nem helyes azt a következtetést levonni, hogy egyedi objektumokkal akkor nem is lehet kísérletezni. Ezt megcáfolták az utóbbi egy-két évtized kísérletei. <

csak tíznél több paraméterrel lehet meghatározni (Guerlin et al., 2007). Ehhez atomokat küldtek át egyesével a rezonátoron, mindegyik kezdeti állapotát nagy pontossággal állították be, és olvasták le a kölcsönhatás végén. Ugyanilyen szekvenciával a fotonmező tetszőleges állapotát rekonstruálni is
