

# KVANTUMOPTIKA ÉS KVANTUMINFORMATIKA

Janszky József

az MTA levelező tagja, PTE TTK Fizikai Intézet és MTA Nemlineáris Optikai Kutatócsoport, MTA SzFKI  
janszky@szfki.hu

Domokos Péter

PhD, tudományos főmunkatárs  
MTA SzFKI

A lézerfizikából kinőtt kvantumoptika célja a fény-anyag kölcsönhatás mikroszkopikus szinten történő tanulmányozása kisszámú atomból vagy molekulából, illetve a sugárzási tér néhány gerjesztett módusából álló rendszereken. Jellemző rá a kísérleti és elméleti kutatások szoros együttműködése: a kvantumoptika fejlődése során a vizsgálat körébe vont új jelenségekre meghatározó jelentőségű a kísérleti ellenőrizhetőség kritériuma. A környezeti hatásoktól elszigetelt, csatolt kvantumdinamikát megvalósító rendszereket legtisztább formában a kvantumoptikán belül sikerült létrehozni. A megfelelő pontosságú leíráshoz szükséges alapok (a Maxwell-egyenletek, a Schrödinger-egyenlet), illetve a kvantumelektrodinamika formalizmusa ismertek, ezért az alapkutatás célja a kölcsönhatások következtében előforduló jelenségek megfigyelése. Például más térelméleti rendszerben nem állíthatók elő az optikában az 1980-as évek végén megvalósított „összenyomott állapotok”, melyekben a fény valamelyik fizikai jellemzőjében a kvantumzaj kisebb a vákuumra jellemző szintnél. A későbbiekben több példát említünk arra, hogy lézerekkel manipulált atomokkal gyengén kölcsönható soktestrendszereket, kvantumfázisátalakulásokat valósíthatunk meg. Végül emeljük még ki azt, hogy a kvantumoptiká-

ban nyílt lehetőség kísérletekben tanulmányozni az Einstein-Podolsky-Rosen-paradoxont és következményeit, amelyből lényegében egy új tudományág, a kvantuminformatika fejlődött ki.

*Kvantumbit fotonokkal, atomokkal*

A mindennapjainkban érzékelt „klasszikus” világ mozgástörvényein túl a kvantummechanika olyan lehetőségeket rejt, mint például egy objektum hullámfüggvényének interferenciaképessége, vagy térben szeparált objektumokon végzett mérések statisztikájában klasszikus valószínűségekkel nem értelmezhető korrelációk megjelenése az ún. összefonódott állapotokban. Ezen jelenségek kiaknázásával forradalmian új alkalmazásokhoz juthatunk el, amelyekben a klasszikus fizika elveit követő eszközökkel nem megoldható feladatokat végeztetünk el „kvantumgépekkel”. Az illusztris példa a *kvantumszámítógép*. A gondolat már korábban felmerült (Richard Feynman), de az érdeklődés akkor fordult igazán a kvantumszámítógép felé, amikor 1994-ben Peter Shor publikált egy algoritmust, amely képes megoldani az exponenciális bonyolultságú faktorizációt (számok szorzótényezőinek megtalálása – ez a jelenleg alkalmazott kriptográfiai alkalmazások kulcskérdése nagy,

négyszáznál több jegyet tartalmazó számok esetén) és egyéb keresési problémákat polinom lépésben, tehát összehasonlíthatatlanul gyorsabban, mint a klasszikus elven működő számítógépek. A Shor-algoritmus megjelenése után matematikusok, informatikusok kvantummechanikát kezdtek tanulni.

A kvantuminformatika kiindulópontja a bit fogalmának általánosítása: a '0' és '1' értékek helyett egy kvantumbit a '0'-val és '1'-gyel címkézett bázisállapotok tetszőleges lineáris kombinációjában lehet. Ezt a lineáris kombinációt nevezzük a klasszikus bit analógiájára kvantumbitnek (*kubitnek*), elvileg 1 kubit végtelen klasszikus bittel egyenértékű. A bázisállapotok lineáris kombinációján keresztül megjelenő kvantuminterferencia lehetőségét kihasználva a kvantumalgoritmusokban a rendszer egy bonyolult összefonódott állapotban egyidejűleg, „parallel” módon végzi a szükséges számításokat. Az IBM egyik kutatócsoportja 2001-ben hét kvantumbiten alapuló kis kvantumszámítógépen sikeresen demonstrálta a Shor-algoritmus működését: faktorizálta a 15-öt, felbontva azt 3-szor 5-re.

A kvantumbit fizikai megvalósítására tetszőleges kétállapotú rendszert használhatunk, amely (i) a környezettől jól elszigetelt, hogy az interferencia-képesség megmaradjon (lassú dekoherencia), (ii) egyetlen kubit megcímezhető és tetszőleges állapotba előállítható, végül (iii) a '0' és '1' bázisállapotok detektálhatók. Ezeket a feltételeket kvantumoptikai rendszerek teljesítik: a kubit információt hordozhatja egy foton polarizációs állapota vagy egy atomban az alap- és egy gerjesztett állapot. Mindkét rendszeren a fény-anyag kölcsönhatáson keresztül kvantumozs szinten kontrollált operációkat lehet elvégezni. Például kétbites kvantumlogikai kapukat atomokkal ioncsapdáknál és mikrohullámú rezonátorokban is megvalósítottak. A kubitet hordozó fotonokkal működő kriptográfiai eszközök

már kereskedelmi forgalomban kaphatók. Sokbites műveletek esetén a dekoherencia exponenciálisan növekszik, ezért még ezen rendszerek zártága sem elegendő technológiai alkalmazásokhoz. A dekoherencia visszaszorítására kvantum-hibajavító eljárásokat dolgoztak ki, néhány (6-10) fizikai kubitet használva 1 logikai kubit hosszú idejű életben tartására.

A jobb megértés érdekében foglalkozunk részletesebben a foton polarizációs állapotával. A polarizációt, kicsit leegyszerűsítve, elképzelhetjük úgy, hogy a foton állandóan „lengeti a karját”. Lengetheti például le-fel vagy jobbra-balra. A le-fel mozgást azonosíthatjuk a '0', a jobbra-balrát az '1' bázisállapottal. Kombinálhatjuk a két mozgást. Ha ugyanakkora amplitúdóval végez le-fel és jobbra-balra mozgást, akkor kaphatunk például lineáris ferde mozgást. Ha a két bázisnak választott mozgás között fáziskülönbség is van, akkor általános esetben elliptikus mozgással állunk szemben. Ha a fáziskülönbség éppen negyed periódus és a két mozgás amplitúdója azonos, akkor az eredő – attól függően, hogy melyik mozgás előzi meg a másikat – az óramutató járásával megegyező (negatív irányú) vagy ellentétes (pozitív irányú) körmozgás lesz. Választhatjuk a két körmozgást is a bázisállapotnak – mondjuk a pozitív irányút a '0', a negatív irányút az '1' bázisállapotnak. Ilyen bázisválasztás esetén természetesen a le-fel és a jobbra-balra mozgások lesznek a két körmozgás lineáris kombinációi. Az optikában megbízható eszközök állnak rendelkezésünkre a foton polarizációs állapotának megváltoztatására, a polarizációs állapotokkal végzett manipulálásra és korlátozott mértékben a polarizáció mérésére.

Ki kell emelni a mérés problémáját. Míg a klasszikus fény (amelyben óriási számú foton van) polarizációs állapotát tetszőleges pontossággal mérhetjük, egyetlen foton esetén csak információvesztéssel járó mérést tudunk elvé-

gezni. A fenti analógiát folytatva a polarizáció mérését úgy lehet elképzelni, hogy a mérés során a „karját lengető” fotonnak át kell hatolnia egy párhuzamos „léckerítésen”. Csak azok a fotonok képesek erre, amelyeknek a lineáris kombinációjában van olyan komponens, amely párhuzamos a „léckerítéssel”. Minél nagyobb ennek a komponensnek az aránya a foton polarizációjában, annál nagyobb a sikeres áthatolás valószínűsége. A foton átjutott vagy nem; ez egy bit információ. Amíg a kubitekkel manipulálunk, elvileg közel végtelen bitet dolgozunk fel egyidejűleg, amikor viszont a végeredményt akarjuk látni, a végtelen bitet tartalmazó kubit a mérés során 1 bitre redukálódik. A mérés egyedi és megismételhetetlen: ha a foton nem jutott át a „léckerítésen”, akkor elveszett, ha átjutott, akkor a polarizációja felveszi a mérőberendezés által megszabott polarizációt, példánkban párhuzamos lesz a „léckerítéssel”. A mérés durva beavatkozás egy kvantumrendszerbe, emiatt lehet például a kvantumkommunikációban egy külső lehallgatót észlelni.

Ha a polarizációja a mérés előtt ugyanakkora amplitúdóval tartalmazta a le-fel és jobbra-balra polarizációt (ilyen a 45°-os ferde, vagy a körmozgást leíró polarizációk), akkor lehetetlen megmondani (egyformán 50-50 % valószínűségű), hogy átmege vagy fennakad-e a foton a „léckerítésen”. Legalábbis ezt mondja a kvantummechanika fizikusok többsége által elfogadott értelmezése. Van egy másik, kisebbségi vélemény, amely a véletlen méréseredmény mögött egy még nem ismert belső szerkezetet („rejtett paraméter”) tételez fel. Olyan neves fizikus, mint Albert Einstein is ezen utóbbi értelmezés híve volt. A vita eldöntésében fontos szerepet kapott a kvantumoptika, erre majd később visszatérünk.

Biztonsággal prognosztizálható, hogy a már meglévő alkalmazások csak előfutárai egy általános áttörésnek, amelynek során a kvantummechanika megjelenik az eszközök működési

mechanizmusában. A miniatürizáció során, amint a technológia az atomi világ méreteit közelíti, az eszközök alkotóelemeinek viselkedésében elkerülhetetlenül megjelennek a kvantumeffektusok. A nagy szellemi kihívás a kvantummechanika tudatos kiaknázása újszerű feladatok elvégzésében, ezek kitalálásában szinte csak a saját fantáziánk korlátoz bennünket. A kvantumoptika eszköztára szisztematikus építkezést tesz lehetővé az egyre összetettebb kölcsönható kvantumrendszerek kialakítása felé.

### *Fénnyel manipulált atomok*

Semleges atomokra a környezet gyengén hat, ezért alkalmas építőkövek egy kvantumjelenségeket produkáló összetett rendszerben. Atomok manipulálását a sugárzási térrel való elektromágneses dipólkölcsönhatáson keresztül végezhetjük. A fény-anyag kölcsönhatásban az atomok tömegközépponti mozgására kifejett mechanikai hatást különböző erőkkel jellemezhetjük. Zárt optikai ciklust alkotó atomi átmeneteket folytonos üzemmódú lézerekkel közel rezonánsan gerjesztve, a polarizációk és a finomelhangolások pontos beállításával ezek az erők nagymértékben szabályozhatók és variálhatók. Részletes tárgyalás helyett most csak azt emeljük ki, hogy egyrészt léteznek potenciállal jellemezhető konzervatív erők, amelyek a lézertér intenzitásával arányosak. Az intenzitás térbeli szerkezetét egyszerű optikai eszközökkel alakíthatjuk, így az atomi mozgás számára különleges potenciálfelületeket hozhatunk létre. A potenciális mozgást használjuk ki az atomok csapdázásában; egy erősen fókuszált lézertel a fókuszpont hullámhossznyi környezetében lokalizálhatjuk az atomokat vagy akár egyetlen atomot. A fókusz lassú mozgatásával az atomot kontrollált módon vihetjük át egy másik helyre („atomcsipesz”). Másik gyakori alkalmazás az állóhullámú térben szinuszosan modulált intenzitással létrehozott ún. „optikai rács”,

ami egy szabályozható szilárdtest-modell. Az erősen kölcsönható elektronokat gyengén kölcsönható semleges atomok helyettesítik, és számukra a periodikus potenciált (rácshiba nélküli „kristályt”, beállítható rácsvektorokkal) a lézertér hozza létre.

Másrészt léteznek sebességgel arányos sűrűlási erők, amelyek az atomok lézeres hűtését, azaz mozgásuk irreverzibilis csillapítását teszik lehetővé. Megfelelő beállítással elérhetjük, hogy fényszórás során az atomok a bejövő foton frekvenciáját átlagosan felfelé konvertálják, és a hiányzó energiát a saját tömegközépponti mozgásuk kinetikus energiájából fedezték. A kinetikus energia elvonásával a gáz hőmérsékletét, azaz a mozgásuk rendezetlenségét csökkenthetjük. A termikus zaj redukálása alapfeltétele annak, hogy az anyagi részecskék viselkedésében megjelenjenek a kvantummechanikai sajátosságok. Ezért a modern kvantumoptikának és atomfizikának a bevezetőben vázolt fejlődési útján a lézeres hűtés módszereinek kifejlesztése olyan mérföldkő, melynek jelentőségét a Nobel-díj Bizottság az 1997. évi díjjal ismerte el.

### Atomhullámok

Lézerrel rutinszerűen lehet alkáli atomok hőmérsékletét a mikrokelvin hőmérséklet alá hűteni (lásd Sörlei Zsuzsa és munkatársai cikkét az 1544. oldalon). Ekkor az atomok helye elmosódik, és kb. 1 mikronos kiterjedésű koherens hullámcsomagként foghatók fel. Az anyagnak a kvantummechanikában megjósolt kettős természetéből – részecske vagy hullám – az atom az utóbbi arcát is megmutatja. Interferencia- és egyéb anyaghullám-kísérletek elvégzésére nyílik lehetőség, amit a litográfiában alkalmazhatunk.

A kvantumoptika nagyon érdekes ága, hogy a klasszikus optikában kiosztott szerepeket felcserélve, az anyagi hullámokat manipuláljuk fényvel. Lézernyalábok térbeli profiljának megfelelő kialakításával prizmát, lensét és diszperzív elemeket lehet az atomhullámok számára készíteni. Az atomhullámok spe-

ciális tulajdonsága, hogy az elektronhéj szabadsági fokai miatt az objektum bonyolult belső szerkezetű. Szemben például a fény polarizációjával (vagy az elektron- és neutronhullámok esetén rendelkezésre álló spin szabadsági fokkal), atomhullámot a belső szabadsági fokokon keresztül nagy térbeli felbontással manipulálhatunk, éppen lézerekkel. Ezt kihasználva fundamentális jelentőségű kísérletekben pontosan kimérték a Welcher Weg információ („Melyik résen haladt át az atom?”) és az interferenciacsíkok kontrasztjának összefüggését.

1999-ben kétréses kísérletben interferenciát figyeltek meg fullerén ( $C_{60}$  és  $C_{70}$ ) molekulákkal, azóta pedig már a még nagyobb tömegű fluorizált fullerénnel ( $C_{60}F_{48}$ , 1632 atomi tömegegység), sőt, élettanilag fontos biomolekulákkal (porfirin) is. Anyaghullámok interferenciájával letapogathatjuk a kvantummechanika határait. Közvetlenül mérhetjük, amint egyre nagyobb objektumok esetében eltűnik a koherencia, ami miatt a makroszkopikus világban nem látunk (egyelőre) kvantumjelenségeket.

### Soktestrendszer

Az atomoptikában, akárcsak a közönséges optikában, a nyaláb fényessége a meghatározó jellemző. Ehhez nagy fázistérbeli sűrűséget kell elérni, tehát egyidejűleg kell az atomokat kis térfogatba koncentrálni (nyaláb esetén fókuszálni) és a sebességtérben is az eloszlás szélességét csökkenteni (azaz hűteni, illetve nyaláb esetén kollimálni). Ez a feladat mágneses-optikai csapdákban végezhető el: a mágneses dipólmomentumra ható sztatikus áramokkal keltett mágneses erővel lehet térbeli csapdázást biztosítani, miközben a csapdázott atomokat lézerekkel megvilágítva hűtjük őket. A háttérgázzal való ütközések eliminálása miatt természetesen nagy vákuumban kell dolgozni.

Tipikusan mintegy  $10^9$ - $10^{10}$  atomot lehet rutinszerűen összegyűjteni a csapda kb.  $\text{mm}^3$ -es térfogatába. Az alacsony hőmérsékleten az atomok hullámszerű kiterjedése megközelíti két atom átlagos távolságát. Ezért a csapdában a hullámcsomagok elkezdenek átfedni, ami kvantumstatistikai jelenségek felbukkanását

eredményezi. Ilyenkor már lényeges, hogy az atomok bozon vagy fermion osztályba tartoznak-e. Ha bozonok (egész spinűek), akkor törekednek egy kollektív állapot elfoglalására, míg a fermionok a Pauli-féle kizárási elvnek megfelelően csak különböző állapotban lehetnek. A kvantumjelenségeknek lenyűgöző mélysége a Wolfgang Pauli által a „semmitől” posztulált szimmetrizálási elv, aminek következményeképpen például a  ${}^6\text{Li}$  és  ${}^7\text{Li}$  atomok alacsony hőmérsékleten teljesen másképp viselkednek.

1995-ben mágneses-optikai csapdában összegyűjtött bozonikus atomok párologtatásával, mint egy forró kávé hűtésekora a legenergikusabbak „kifűjésével”, sikerült kvantum-fázisátalakulást előidézni: a ritka atomos gáz a csapda alapállapotában kondenzálódott, amint azt a Bose-Einstein-statisztika megjósolta. Ezt a fázisátalakulást nem a termikus, hanem a kvantumfluktuációk idézik elő. Az alkáli atomok Bose-Einstein-kondenzációjának megfigyeléséért 2001-ben Nobel-díjat adtak.

A kondenzált fázisban az összes atom hullámfüggvénye azonos. A kondenzátum egy makroszkopikus hullámfüggvénnyel adható meg, ami az atomoptikában analóg a lézer optikai szerépével, ezért atomlézerek is tekinthetők. Némrég sikerült folytonos üzemmódú atomlézert előállítani (Chikkatur et al., 2002).

Az első megvalósításuk óta, az elmúlt egy évtizedben a Bose-Einstein-kondenzátumok vizsgálata exponenciálisan növekszik. Amennyire érdekessé teszi ezt a makroszkopikus kvantumobjektumot, az éppen az ideális gáztól való eltérése, vagyis hogy a kondenzátumot alkotó atomok egymással kölcsönhatnak. A kölcsönhatás elengedően gyenge ahhoz, hogy a mérési eredményeket alapelvekből kiindulva, analitikus számolásokkal lehessen összevetni. Ugyanakkor a kölcsönhatás miatt a kondenzátumban már észlelhető nemlineáris- (atom)optikai jelenségek bukkannak fel. Ilyen például az önfenntartó hullámok, ún. szolitonok keltése, amelyek a szabad térben való terjedés közben megőrzik alakjukat és koherenciájukat. Atomos gázokban alacsony hőmérsékleten megfigyelhető kvantumjelenségre jó példa a kvantált perdület és a

szuperfolyékonyság, aminek bizonyítékeként egy Bose-kondenzátumban külső lézerral kialakított perturbációt forgatva vortexek születnek.

Az atomok ütközése ezen az ultraalacsony hőmérsékleten koherens folyamat, és szórásai képpen egyetlen paraméterrel, a szórásai hosszal jellemezhető. A szórásai hossz nagysága a kölcsönhatás erősségére jellemző, emellett előjeles mennyiség, mely negatív tartományban vonzó, pozitív tartományban taszító kölcsönhatást ír le. Más soktestrendszerrel (például elektrongáz egy szilárdtestben) ellentétben a hideg atomok ütközésében a szórásai hossz egy külső mágneses térerősséggel hangolható paraméter (a nukleáris fizikából ismert Feshbach-rezonanciával analóg jelenség). Új dimenziókat nyit fundamentális jelenségek tanulmányozásában, hogy az atomokkal megvalósított soktestrendszerekben a kölcsönhatás erősségét változtatni lehet, sőt, vonzó és taszító kölcsönhatások között kapcsolgathatjuk a rendszert.

### *Fermi-gázok*

#### *magas hőmérsékletű szupravezetés*

Alacsony hőmérsékleten a Fermi-gáz azonos atomjai egyesével töltik be az egyre magasabb fekvő energianívókat. Nagy sűrűség esetén az alacsonyban fekvő állapotok gyorsan betöltődnek, és a többi atom magasabb energiájú állapotba kényszerül, ami az átlagos energia megnövekedését okozza ahhoz képest, amit a Pauli-féle kizárási elv nélkül várnánk. Ez az ún. Fermi-nyomás, ami – ellensúlyozva a gravitációs kollapszust – neutroncsillagokban felelős azok stabilitásáért. A kvantumos degeneráció megjelenésének tipikus hőmérsékleteskálája a Fermi-hőmérséklet, aminek 20 %-a alá sikertült lézerekkel és mágneses párologtatással  ${}^{40}\text{K}$  gázt hűteni (De Marco – Jin, 1999). A Feshbach-rezonancián keresztül az ütközési hossz változtatásával egy újabb fázisátalakulás következik be. A fermionok Cooper-párokat képeznek, amik már összetett bozonoknak tekinthetők, és az adott nagyon alacsony hőmérsékleten kondenzációra képesek. Ez éppen a magas hőmérsékletű szupravezetés jelenségével

analóg. A kölcsönhatás erősségének hangozásaival a gyenge pátkorreláció és a szorosan kötött kétatomos molekulaállapot között folytonosan változtathatjuk a rendszert. Szemben más rendszerekkel, a szupravezetés fázisátmenete itt a Fermi-hőmérsékletnél nem nagyságrendekkel alacsonyabb hőmérsékleten, hanem annak akár már a felénél is bekövetkezhet. Furcsa módon a szupravezetéssel analóg fázisátalakulás hőmérséklete egyidejűleg a legalacsonyabb abszolút és a legmagasabb relatív hőmérséklet. Nemrégiben mérésekkel igazolták a Cooper-párok megjelenését (Chin et al., 2004) és kondenzációját egy szuperfolyékony állapotban, ahol forgatás hatására vortexek jelennek meg (Zwierlein et al., 2005).

### *Egyfoton, két foton ...*

Pumpalézer egy fotonjából nemlineáris kristályban két foton keletkezik, melyek polarizációjának kvantumállapota éppen az Einstein-Podolsky-Rosen-féle összefonódott állapotban van. Ilyenkor a két fotonnak csak együttesen van állapota, külön-külön nincs. A pár egyik tagját detektálva a másik foton azonnal „elnyeri” identitását, és egyfotonos állapotba kerül, amelyben az összes jellemzője (helye, polarizációja) meghatározottá válik. Megemlítjük, hogy bár az egyik foton detektálása során a másik foton állapota térben távol egyidejűleg megszületik, információt nem lehet ezen a módon a fénysebességnél gyorsabban továbbítani.

John Bell még a hatvanas évek végén, 70-es évek elején felismerte, és azt az ún. Bell-egyenlőtlenségekben számszerűen levezette, hogy az összefonódott pár két tagján korrelációs méréseket végezve kísérletileg lehet dönteni a kvantummechanika és a lokális realizmus elmélete között. Az 1990-es évek második felére jutott el a kísérleti technika és az elméleti gondolkodás arra a szintre, hogy parametrikusan keltett összefonódott fotonpárokon a Bell-egyenlőtlenség sértésének nagyon pontos kimérésével megcáfolták a

lokális realizmus elméletét (pontot téve Einstein Niels Bohnnal folytatott vitájára). Bebizonyosodott tehát, hogy az össz-szefonódott fotonpárban valóban nincs állapotuk az egyes fotonoknak, és nem csak számunkra ismeretlen, egy vagy több „rejtett paraméterrel” kódolt, egyébként létező állapot.

Az összefonódottság olyan kommunikációs csatornát nyit meg, amelyen keresztül objektumok kvantumállapota közvetíthető két távoli pont között („teleportáció”). Ha „Feladó” egyetlen kubitet, például egy foton polarizációs állapotát szeretné eljuttatni „Címzettnek”, akkor előzőleg egy kétrészecskés maximálisan összefonódott állapotot osztanak meg egymás között. A „Feladó” egy olyan közös mérést hajt végre az esetleg általa sem ismert teleportálandó állapotban és a fotonpár neki jutott felén, ami ezt a két fotont maximálisan összefonja. Ekkor a „Címzettnek” jutott, a mérésig összefonódott fotonpár egyik tagjaként határozatlan polarizációjú foton a mérés után polarizációt nyer. Ez a polarizáció (négy lehetséges értéke van – ez két klasszikus bit – a „Feladó” által végzett mérés négy lehetséges kimenetelének megfelelően) minden negyedik esetben pontosan megegyezik az eredeti teleportálandó állapottal. A másik három esetben a „Címzettnek” valamilyen egybites műveletet kell végrehajtania a hozzá került foton polarizációján ahhoz, hogy a teleportálandó állapotot létrehozza. A „Feladó” által a „Címzettnek” eljuttatott két bit (például 0, 1, 2 vagy 3) adja azt az információt, aminek alapján a szükséges műveletet a „Címzett” kiválasztja. 0 esetén nem csinál semmit, az állapot már kész, 1 esetén felcseréli a le-felt a jobbra-balra mozgással, vagyis elforgatja a foton polarizációját 90°-kal ahhoz, hogy a teleportáció sikeres legyen, 2 és 3 esetén hasonló, habár kissé bonyolultabb változtatást hajt végre a neki jutott foton polarizációján.

Ez már annyira fejlett technológia, hogy abszolút nem laboratóriumi körülmények

között, például az Alpok csúcsai között, illetve Bécsben a Duna egyik partjáról, egy vízalatti optikai kábelen átküldve a fotonpár egyik tagját, a másik partra teleportáltak kvantumállapotot (Ursin et al., 2004). Összefonódott fotonállapotok parametrikus kristályokat használó előállításában gyors fejlődés mutatkozik, több fotonpárt kelve, majd a fotonpárok között „keresztben” együttes méréseket végezve öt fotonot tartalmazó összefonódott állapot előállításáról számoltak be nemrégiben.

Az elmúlt ötven évben a kvantummechanika meghatározó jelentőségű volt a mindennapi életünkben, gondoljunk az atomenergiára, lézerekre, tranzisztorra. Most úgy tűnik, hogy éppen ezeknek a vívmányoknak köszönhetően egy olyan tudományos forradalom kapujában vagyunk, amikor a makroszkopikus helyett a mikroszkopikus szinten használhatjuk az elemi kvantumjelenségeket. Amit a kvantummechanika

atyjai csak gondolat kísérletnek (Gedankenexperiment) neveztek, az mára laboratóriumi valóság, és helyette a Gedanken Technology fogalma született meg. Amennyire most meg lehet ítélni, két-három év múlva kívánság szerinti összefonódott állapotokat tudnak előállítani, biztonságos logikai kubiteket lehet néhány fizikai kubit segítségével implementálni, ezek a logikai kubitok a megismételt kvantumhibajavító eljárások révén tartósak lesznek. Ekkorra a néhány fizikai kubiton megvalósított logikai kubitet nagy megbízhatósággal lehet egyik rendszerről egy másikra átvinni. Hét-nyolc év múlva ötven fizikai kubiton realizált többszörös logikai kubitet tudnak használni, közel jutva egy valódi kvantumszámítógép megvalósításához.

*Kulcsszavak: atomhullámok, kvantumbit, kvantumstatisztika, összefonódottság, teleportáció*

#### IRODALOM

- Chikkatur, A. P. – Shin, Y. – Leanhardt, A. E. – Kielpinski, D. – Tsikata, E. – Gustavson, T. L. – Pritchard, T. E. – Ketterle, W. (2002): Science. **296**, 2193–2195.  
 Chin, C. – Bartenstein, M. – Altmeyer, A. – Riedl, S. – Jochim, S. – Hecker Denschlag, J. – Grimm, R. (2004): Science. **305**, 1128–1130.  
 DeMarco, B. – Jin D. S. (1999): Science. **285**, 1703–1706.  
 Ursin, R. – Jennewein, T. – Aspelmeyer, M. – Kaltenbaek, R. – Lindenthal, M. – Walther, P. – Zeilinger, A. (2004): Nature. **430**, 849.  
 Zwiernlein, M. W. – Abo-Shaeers, S. R. – Schirotzek, A. – Schunck, C. H. – Ketterle, W. (2005): Nature. **435**, 1047–1051.

