

Kvantumoptika és kvantuminformatika

Janszky József, MTA levelező tagja, PTE TTK Fizikai Intézet és MTA Nemlineáris Optikai Kutatócsoport
Domokos Péter, tudományos főmunkatárs, MTA SzFKI

2005. szeptember 6.

A kvantumoptika a lézerfizikából kinőtt terület, amelynek célja a fény-anyag kölcsönhatás mikroszkopikus szinten történő tanulmányozása kis számú 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 jelentőséggel bír 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, úgymint 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 felhozunk arra, hogy lézerekkel manipulált atomokkal gyengén kölcsönható soktestrendszereket, kvantum-fázisátalakulásokat valósíthatunk meg. Végül emeljük még ki azt, hogy a kvantumoptikában 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 faktorizáció (számok szorzótényezőinek megtalálása — ez a jelenleg alkalmazott kriptográfiai alkalmazások kulcskérdése nagy, 400-nál 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'-el címkézett bázisállapotok tetszőleges lineáris kombinációjában lehet. Ezt a lineáris kombinációt nevezzük a klasszikus bit analógiájára kvantumbitnek (kubit-nek), 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, ami (i) a környezettől jól elszigetelt, hogy az interferenciaképesség megmaradjon (lassú dekoherencia), (ii) egyetlen kubit megcímezhető és tetszőleges állapota 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 kvantumos szinten kontrollált operációkat lehet elvégezni. Például kétbites kvantumlogikai kapukat atomokkal ioncsapdában és mikrohullámú rezonátorokban is megvalósítottak. A kubiteket hordozó fotonokkal működő kriptográfiai eszközök már kereskedelmi forgalomban kaphatók. Sokbites műveletek esetén a dekoherencia exponenciálisan növekszik, ezért még ezen rendszerek zártsága 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 elvégezni. A fenti analógiát folytatva a polarizáció mérését úgy lehet elképzelni, hogy a mérés során a „karját lengető” fotonnak át kell hatolni 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 45o-os ferde, vagy a körmozgást leíró polarizációk), akkor lehetetlen

megmondani (egyformán 50-50 "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 paramétert") tételez fel. Olyan neves fizikusok, mint például Einstein tartoztak ezen utóbbi értelmezéshez. A vita eldöntésében döntő szerepe volt a kvantumoptikának, 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, ezért kísérleti terepet nyújt a soktestproblémák vizsgálatához, a kvantuminformatikához, és ezek jövőbeli alkalmazásaihoz.

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 kifejtett 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 potenciálos mozgást használjuk ki az atomok csapdázásában, egy erősen fókuszált lézerral a fókuszpont hullámhossznyi környezetében lokalizálhatjuk az atomokat vagy akár egyetlen atomot. A fókusz lassú mozgásával az atomot kontrollált módon vihetjük át egy másik helyre ("atom csipesz"). 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 súrlódási 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 egy mérföldkő, melynek jelentőségét a Nobel-díj Bizottság az 1997-ik évi díjjal ismerte el.

Atomhullámok

Lézerral rutinszerűen lehet alkáli atomok hőmérsékletét a mikrokkelvin hőmérséklet alá hűteni. 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 prizmat, lencsét, és diszperzív elemeket lehet az atomhullámok számára készíteni. Az atomhullámok speciális tulajdonsága, hogy az elektronhéj szabadsági fokai miatt az objektumnak bonyolult belső szerkezete van. 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 interferencia csíkok kontrasztjának összefüggését.

1999-ben kétréses kísérletben interferenciát figyeltek meg fullerén (C60 és C70) molekulákkal, azóta pedig már a még nagyobb tömegű fluorizált fullerénnel (C60F48, 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 statikus 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. mm^3 -es térfogatába. Az alacsony hőmérsékleten az atomok hullámszerű kiterjedése megközelíti két atom közötti átlagos távolságot. Ezért a MOT csapdában a hullámcsomagok elkezdnek átfedni, ami kvantumstatisztikai jelenségek felbukkanását eredményezi. Ilyenkor már lényeges, hogy az atomok bozon vagy fermion osztályba tartoznak. Ha bozonok (egész spinűek), akkor törekednek egy kollektív állapot elfoglalására, míg a fermionok a Pauli-kizárási elvnek megfelelően csak különböző állapotban lehetnek. A kvantumjelenségeknek lenyűgöző mélysége a Pauli által a „semmiből” 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 hűtésekor 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 szerepével, ezért atomlézernek is tekinthetjük. Nemrég sikerült folytonos üzemmódú atomlézert előállítani [1].

Az első megvalósításuk óta, az elmúlt egy évtizedben a Bose-Einstein kondenzátumok vizsgálata exponenciálisan növekszik. Ami ennyire érdekessé teszi ezt a makroszkopikus kvantumobjektumot, az éppen az ideális gáztól való eltérése, vagyis hogy a kondenzátumot alkotó atomok egymással kölcsönhatnak. A kölcsönhatás elegendően gyenge ahhoz, hogy a mérési eredményeket alapelvekből kiindulva, analitikus számolásokkal lehet 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 kvantumjelenségekre jó példa a kvantált perdület és a szuperfolyékonyság, aminek bizonyítékeként egy Bose kondenzátumban külső lézerrel kialakított perturbációt forgatva vortexek születnek.

Az atomok ütközése ezen az ultraalacsony hőmérsékleten egy koherens folyamat, és szórási képben egyetlen paraméterrel, a szórási hosszal jellemezhető. A szórási hossz nagysága a kölcsönhatás erősségére jellemző, emellett egy előjeles mennyiség, negatív tartományban vonzó, pozitív tartományban taszító kölcsönhatást ír le. Más soktestrendszerekkel (pl. elektrongáz egy szilárdtestben) ellentétben a hideg atomok ütközésében a szórási 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 kapcsolhatjuk a rendszert.

Fermi gázok, magas hőmérsékletű szupravezetés

Alacsony hőmérsékleten a Fermi gáz azonos atomjai egyesével töltik be az egyre magasabban fekvő energianívókat. Nagy sűrűség esetén az alacsonyan 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 a stabilitásukért. A kvantum degeneráció megjelenésének tipikus hőmérsékletszála a Fermi-hőmérséklet, aminek 20lézerekkel és mágneses párologtatással 40K gázt hűteni [2]. 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 hangolásával a gyenge párkorreláció 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 [3] és kondenzációját egy szuperfolyékony állapotban, ahol forgatás hatására vortexek jelennek meg [4].

Egyfoton, két foton, ...

Pumpalézer egy fotonjából nemlineáris kristályban két foton keletkezik, melyek polarizációjának kvantumállapota éppen az Einstein-Podolsky-Rosen által leírt, 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 megszűnik, 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 Bohrral folytatott vitájára). Bebizonyosodott tehát,

hogy az összefonódott fotonpárban valóban nincs állapota az egyes fotonoknak, és nem csak számunkra ismeretlen, egy vagy több "rejtett paraméterrel" kódolt, egyébként létező állapot.

Az összefonódottság kommunikációs szempontból egy kvantumcsatorna, rajta keresztül objektumok kvantumállapota közvetíthető két távoli pont között "teleportálható". Ha "Feladó" egyetlen kubitet, pl. egy foton polarizációs állapotát szeretné eljuttatni "Címzett"-nek, 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 állapoton és a fotonpár neki jutott felén, ami ezt a két fotont maximálisan összefonja. A "Feladó" egy olyan közös mérést hajt végre az esetleg általa sem ismert teleportálandó állapoton és a fotonpár neki jutott felén, ami ezt a két fotont maximálisan összefonja. Mint már láttuk ilyen összefonódott állapot négy van. Ekkor a "Címzettnek" jutott, a mérésig egy 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 végrehajtani 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, vagyis elforgatja a foton polarizációját 90o fokkal 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, pl. az Alpok csúcsai között, illetve Bécsben a Duna egyik partjáról, egy vízalatti optikai kábelén átküldve a fotonpár egyik tagját, a másik partra teleportáltak kvantumállapotot

[5]. Összefonódott fotonállapotok parametrikus kristályokat használó előállításában gyors fejlődés mutatkozik, több fotonpárt keltve, majd "keresztben" együttes méréseket végezve öt fotont 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, 2-3 év múlva kívánság szerinti összefonódott állapotokat tudnak előállítani, biztonságos logikai kubiteket lehet néhány fizikai kubit segítségével implementálni, ezek a logikai kubit a megismételt kvantum-hibajavító eljárások révén tartósak lesznek. Ekkorra a néhány fizikai kubitén megvalósított logikai kubitet nagy megbízhatósággal lehet egyik rendszerről egy másikra átvinni. 7-8 év múlva 50 fizikai kubitén realizált többszörös logikai kubitet tudnak használni, közel jutva egy valódi kvantumszámítógép megvalósításához.

1 Ketterle et al., Science 296, 2193 (2002)

2 B DeMarco and D S Jin, Science 285 1703 (1999)

3 Grimm et al. Science 305, 1128 (2004)

4 Ketterle, Nature 435, 1047 (2005).

5 Zeilinger et al., Nature 430, 849 (2004)