

GÁBRIS AURÉL

Doktori (Ph.D.) értekezés
tézisei

TÖBBRÉSZŰ KVANTUMOPTIKAI RENDSZEREK
A KVANTUMINFORMATIKÁBAN

Készült a Magyar Tudományos Akadémia
Szilárdtestfizikai és Optikai
Kutatóintézetében Budapesten

Témavezető

JANSZKY JÓZSEF

az MTA rendes tagja

Konzultáns

GIRISH S. AGARWAL

Noble Chair

Oklahoma State University, Stillwater



Szegedi Tudományegyetem
Szeged, 2007

Kivonat

A kvantumoptika sikerének egyik oka, hogy kísérleti eszköztárával könnyen állíthatók elő és figyelhetőek meg környezetüktől izolált kvantumrendszerek. Ezen túlmenően, a kvantumoptika elméleti eszköztára alkalmas olyan, sokkal általánosabb kvantummechanikai alapproblémák kimerítő tárgyalására, mint amelyek a kvantuminformatikában kerültek előtérbe. Ezek alapján nem meglepő, hogy a kvantumoptika jelentős alkalmazást talált a kvantuminformáció számos kísérleti is elméleti területén. A kvantuminformatika igazi lehetőségei a többrésű kvantumrendszerekre való alkalmazásában rejlik, ezért ezek tanulmányozása elsőrendű feladat.

A dolgozatban ismertettük összefonódott állapotok egy koherensállapotok szerinti reprezentációját. Általánosítottuk az optikai Schrödinger-macska állapotokat két módusra, majd tárgyaltuk koherensállapot kvantumbitek teleportációját és dekoherenciáját. Két javaslatot tettünk univerzális kvantum-logikahálózat optikai üregrezonátorban csapdázott atomokkal történő megvalósítására. Javaslatainkban törekedtünk a skálázhatóságra, és a szokásos dekoherencia tényezők minél eredményesebb kiküszöbölésére.

Áttekintés

A kvantuminformáció-elmélet forradalmian új elméleti eredményeket alkotott a gépi számítások hatékonyságának növelése és a telekommunikáció biztonságosabbá tételének terén. Ezen eredményeket azonban eddig még nem követték nagymérvű kísérleti megvalósítások. Minden kvantuminformáció-feldolgozási protokoll megvalósításának egyik előfeltétele, hogy megtaláljuk a kiválasztott fizikai rendszer megfelelő reprezentációját. Különösen kvantumszámítások megvalósítása esetén, ezzel párhuzamosan szükség van kvantuminformáció nagy hibatűrésű módon történő kezelésére is.

Kvantumoptikai megvalósításokban, a fizikai rendszer rendszerint egy vagy több elektromágneses módusból, esetleg üregrezonátorban lévő atomokból áll. Ezek a jelöltjeink kvantumbitek megvalósításához. A tisztán optikai kvantumrendszerek többnyire számos elektromágneses módust alkalmaznak, és a legnagyobb sikerrel alkalmazott alapösszetevőik passzív lineáris eszközök (pl. nyalábosztók) és fotodetektorok. Ezekben a rendszerekben, a kvantumbiteket az elektromágneses módusok kvantumállapotaiban kódolják, és a kvantumlogikai műveleteket a lineáris eszközökkel valósítják meg. Bizonyos elrendezésekben, ezeket továbbkombinálják detektormérésekből vett visszacsatolásokkal. Minthogy az elektromágneses tér szabadsági fokainak száma rendkívül nagy, kvantumbitek ábrázolásának módjai is hasonlóan tágak. Már egyetlen kvantumbit ábrázolásának megválasztásánál is szembesülünk azzal, hogy egy, kettő vagy akár több módust is felhasználhatunk. Sőt, ha döntöttünk is valamelyik módus mellett, még akkor is választhatunk diszkrét, illetve folytonos ábrázolások között, miközben rendelkezésünkre áll az ábrázolásra használt lineáris alterdimenziójának megválasztása is.

Azon megvalósításokban, melyek az üregrezonátor kvantum-elektrodinamikáját használják ki, a rezonátorban lévő atomok is használhatók kvantumbitek ábrázolására. Ilyen esetekben, az elektromágneses tér tulajdonságaiból fakadó választási szabadság tovább bővül azzal, hogy az atomok releváns elektronállapotainak energiaszint-szerkezete is megválasztható azzal, hogy milyen atomot és annak melyik spektrális rezonanciáját használjuk. További gazdag lehetőségek tárulnak fel előttünk, amint a

kvantuminformáció-kezelés megvalósításához alapot nyújtandó, a tárgyalásban figyelembe vesszük a rezonátorban ébredő atom–foton kölcsönhatást. Elméleti oldalról tekintve, a rendszer rengeteg elrendezést tesz lehetővé az atomi szintek szerkezetének, a közel rezonáns rezonátormódusok frekvenciájának és polarizációjának, illetve a külső pumpáló lézerek paramétereinek megválasztásával. Az üregrezonátor kvantum-elektrodinamikáján alapuló kvantumszámítástechnikai kutatás célja, a különböző feltételek mellett legmegfelelőbb elrendezés megtalálása.

Nagyon fontos feltételt jelentenek a rendszer dekoherencia jelenségei. Mivel ezen jelenségek gördítik a legkomolyabb akadályokat a kísérleti megvalósítások elé, ezért ezeket a lehetőség szerint figyelembe kell venni minden elméleti javaslatban. Dekoherencia általában a kvantumbitek környezettel vagy egymással történő nemkívánt kölcsönhatása miatt lép fel, és eredményeképpen akár a teljes kezdetben kódolt információ is elveszhet. Az üregrezonátoros kvantumrendszerek jellemző dekoherencia-csatornái a fotonvesztés és a gerjesztett atomi állapotok spontán bomlása.

Célkitűzések

A dolgozat célkitűzései a következőképpen foglalhatóak össze:

- Kétmódusú elektromágneses tér és kvantumbitek általános állapotainak koherensállapot-reprezentációjának kidolgozása, az utóbbiak dekoherenciájára is összpontosítva.
- Atom és üregrezonátor rendszereken megvalósított univerzális kvantum-logikaihálózatok elméleti kidolgozása, figyelemmel a skálázhatóságra és a hibatűrésre.

Vizsgálati módszerek

A Disszertáció 2. és 3. fejezete kissé elkülönül egymástól az alkalmazott fizikai rendszereket és kölcsönhatásokat tekintve. Az alábbi két szakaszban külön-külön mutatjuk be a bennük alkalmazott vizsgálati módszereket.

Koherens-állapot kvantumbitek

A koherens-állapotok több szempontból is érdekes osztályát képezik az elektromágneses tér kvantumállapotainak. Fontosak egyrészt a kvantumállapot-reprezentációt illetően, mivel egy teljes folytonos bázist alkotnak, másrészt mert természetes bázisként használhatóak a fény szokványos dekoherencia jelenségeinek leírásánál. Továbbá, koherens-állapotok előállíthatóak ideális lézerekkel, így ezek az állapotok könnyen rendelkezésre állnak. A koherens-állapot kvantumbitekkel kapcsolatos eredményeinket a 2. fejezetben gyűjtöttük össze.

A koherens-állapotok egyetlen komplex változóval jellemezhetőek, ami a klasszikus amplitúdónak és fázisnak feleltethető meg. A kvantumállapot-reprezentáció szempontjából érdekes, hogy a koherensállapot-bázis túlteljes, azaz a koherens-állapotok szerinti kifejtés nem egyértelmű, továbbá hogy minden koherens-állapot átfed egymással. Az egydimenziós koherensállapot-reprezentáció alkalmazásakor az elektromágneses tér állapotait olyan koherens-állapotok szerint fejtjük ki, amelyek a fázistérben egyetlen folytonos görbe mentén helyezkednek el. Ezt a reprezentációt azért nevezzük egydimenziósnak, mert ezt a folytonos görbe egyetlen valós változóval paraméterezhető. Ezen reprezentáció reprezentáció működésének hátterében is ez a túlteljesség áll. Az egydimenziós koherensállapot-reprezentáció egyik speciális esete, amikor a kiválasztott körbe egy origón áthaladó egyenes. Ebben az esetben egy diszkrét bázis is kifejezhető Hermite polinomok segítségével.

Az egydimenziós koherensállapot-állapot reprezentáció általánosításának igénye összefonódott állapotok leírásának szükségességénél merül fel. A mi általánosításunk a kétmódusú összenyomáson alapul. Eredményeinket a 2.1. szakaszban ismertettük, amelyben először megadtuk a kétmódusú-összenyomott vákuum egyetlen komplex paraméter felhasználásával történő, $|\alpha\rangle|\alpha^*\rangle$ -hez hasonló alakba írható, kétmódusú koherens-állapotok szerinti kifejtését. A kifejtés súlyfüggvényére egy Gauss-eloszlás adódott, majd a továbbiakban megmutattuk, hogyan definiálható egy diszkrét bázis Laguerre-2D polinomok segítségével. Az így értelmezett egykomplexsík-reprezentáció teljességét a Laguerre-2D polinomok teljességét felhasználva bizonyítottuk.

Az egykomplexsík-reprezentáció kétmódusú-összenyomott állapotok tárgyalásakor és dekoherencia leírásánál bizonyult különösen hasznosnak. Ezt

a reprezentációt használták a folytonos változós kvantumteleportáció ideális és veszteséges eseteinek tanulmányozásánál is.

A 2.2. szakaszban, az egykomplexsík-reprezentációból kiindulva bevezettünk kétmódusú Schrödinger-macska állapotokat. Ezek az állapotok a szokásos optikai Schrödinger-macska állapotoknak olyan általánosításai, amelyek akár két ebit összefonódottságot is mutatnak. Kidolgoztunk egy formalizmust nemortogonális bázisban megadott tiszta kvantumállapotok összefonódottságának kiszámítására. A kétmódusú Schrödinger-macska állapotok összefonódottságát ezen formalizmus segítségével számítottuk ki. Meghatároztuk, hogy melyik típusú Schrödinger-macska állapot szolgálhat megbízhatóan a legnagyobb mértékű összefonódottsággal, és felhasználtuk ezt az állapotot, mint kvantumcsatornát egy teleportációs eljárásban. Pontosabban meghatároztuk melyik a használandó Bell-projekció, és elméletileg készítettünk egy optikai optikai összeállítást, amivel a sikeres teleportáció valószínűsége $1/8$.

A 2.3. szakaszban koherens-állapot kvantumbitek dekoherencia-problémáját vizsgáltuk egy, az optikában bevetten használt modell segítségével. A használt modellben a környezettel való kölcsönhatást egy nyalábosztóval helyettesítjük, aminek az egyik bemeneti portján a rendszer állapota, a másikon a környezetet leíró módus lép be. A nyalábosztón történt kölcsönhatás után a környezethez tartozó módust elvetjük, ami egy részleges nyomképzésnek felel meg. Természetes körülmények között a környezet egy vákuumhoz közeli termális állapotban van, ám bizonyos esetekben a vizsgált rendszer közvetlen környezetét valamely más állapotba is hozhatjuk.

Egy determinisztikus döntési algoritmus kiolvasási problémáját tanulmányoztuk a fent említett dekoherencia mechanizmus tükrében. Az ilyen algoritmusok egyik különlegessége, hogy eredményük kizárólag valamelyik bázisállapot lehet, és nem azok szuperpozíciója. Jó példa erre a Deutsch és a Deutsch—Jozsa-algoritmus. Ezen esetekben tehát, egy koherens-állapotokon alapuló megvalósításban a kiolvasási probléma a két optikai Schrödinger-macska állapot megkülönböztetését követeli meg. A megkülönböztethetőséget a Sanov-tétel kvantummechanikára vonatkozó változatának segítségével számszerűsítettük. Ezt a tételt felhasználva, az optimális mérésekkel elérhető sikeres megkülönböztetés valószínűségét kvantumrelatíventrópiák kiszámításával határozhattuk meg.

Megvizsgáltuk azt az esetet, amikor a környezet összenyomott vákuum állapotba preparálható, és megkerestük az összenyomási paraméter azon

optimális értékét, amely az adott reprezentáció és dekoherencia mellett a legnagyobb megkülönböztethetőséget adja. Azt találtuk, hogy a megkülönböztetőségre vett hatásuk szempontjából, a rendszer összes fázisviszonya leírható egyetlen változóval. Ez a fázisváltozó a Schrödinger-macskák fázisát, a környezet összenyomásának szögét, és a nyalábosztó fázisait additívan tartalmazza. Átfogó numerikus eredményeink arról tanúskodnak, hogy ennek a fázisváltozónak az optimális értéke nulla. Vizsgáltuk, továbbá, hogy hogyan függ a megkülönböztethetőség értéke a nyalábosztó áteresztőképességétől, az összenyomás mértékétől és a Schrödinger-macska állapotokat alkotó koherens-állapotok intenzitásától. Numerikus eredményeink, minden általunk vizsgált esetben azt mutatták, hogy az összenyomás mértékének létezik egy optimális értéke minden áteresztőképesség és intenzitás mellett. Eredményeink azt is mutatják, hogy a megkülönböztethetőség relatív javulásának optimális értéke növekszik a bázisállapotokat alkotó koherens-állapotok intenzitásával.

Kvantum-logikaihálózatok atom-rezonátor rendszerekben

A 3. fejezetben az üregrezonátor kvantum-elektrodinamikáján alapuló kvantumszámítógépre adott két javaslatunkat mutattunk be. Mindkét elrendezésben feltételeztük, hogy a jól lokalizált, semleges atomok, az erős csatolás tartományában hatnak kölcsön az üregrezonátor terével. Mivel az atomok semlegesek, nem lép fel közöttük közvetlen kölcsönhatás, és köztük az egyetlen számottevő közvetítő az üregrezonátor tere.

A 3.1. szakaszban egy olyan elrendezéssel foglalkoztunk, amelyben az atomok a kölcsönhatásban két alapállapottal és két gerjesztett állapottal, az üregrezonátor pedig két ellenkezően cirkulárisan polarizált módussal vesz részt. Amikor az üregrezonátor módusainak frekvenciái távol vannak hangolva az atomi átmenettől, továbbá, egy olyan kezdeti állapotból indulunk, amely a két alapállapot szuperpozíciója, valamint a rezonátortér egyetlen gerjesztést tartalmaz, akkor bizonyos közelítéseket alkalmazva a rendszer Hamilton-operátora nagyban leegyszerűsíthető. Ilyen körülmények között, a Hamilton-operátor egy csillag-szerű topológiájú spin z - z kölcsönhatásnak felel meg úgy, hogy egy központi spin páronként kölcsönhat a többi spinnel, de amazok egymással nem hatnak kölcsön. Ebben az analógiában a központi spin az üreg polarizált fotonjának, a többi spin pedig a kétállapotú atomoknak felel meg.

Kvantum-logikai hálózatok tárgyalásának előkészítése gyanánt egy-egy kvantumbitot feleltettünk meg minden atomnak, és egy további kvantumbitot az üregrezonátorban található polarizált fotonnak. Egy N atomot tartalmazó rendszer esetében, tehát, ez $N + 1$ kvantumbitnek felel meg, amelyek közül a fotonikus kvantumbit megkülönböztetett szerepet játszik. A mag mágneses rezonanciáján alapuló kvantumszámítógép elméletéből ismert újrafokuszálás technikáját alkalmazva, effektív két-kvantumbites kapukat vezettünk le az említett spin z - z csatolásból. Az újrafokuszálás megvalósításához elegendő az atomokon végrehajtani egy-kvantumbites műveleteket, amely műveletek kivitelezhetők rezonáns Raman-impulzusok alkalmazásával. Javaslatot tettünk CNOT kapuk megvalósítására oly módon, hogy a szükséges egy-kvantumbites műveleteket úgy valósítjuk meg, hogy a Raman-impulzusokat kiegészítjük egy üregbe vitt kétállapotú atommal, melynek rezonancia frekvenciáját egy külső statikus elektromos térrel változtatjuk. Rámutattunk, hogy amennyiben rendelkezünk CNOT kapukkal a fotonikus kvantumbit és mindegyik atomi kvantumbit között, minden kvantumművelet megvalósítható egy olyan sémában, amelyben a fotonikus kvantumbit egy „optikai busz” szerepét tölti be.

Ebben a javaslatban egy olyan rendszert írtunk le, amely skálázhatóságának nincsenek elvi akadályai, hiszen N elvileg bármilyen nagyságrendű szám lehet. Továbbá, mivel az atomoknak csak az alapállapotát használtuk, az atomi szintek bomlásából származó dekoherencia hatása nem jelentős. A dekoherencia szempontjából az egyetlen komoly akadályt a rezonátor vesztesége jelenti, ami miatt a megfelelő jósági tényezőjű üregrezonátor készítése komoly kihívást jelenthet.

A 3.2. szakaszban egy másik elrendezéssel foglalkoztunk, amelyben az atomoknak két állapota hat kölcsön diszperzíven az üregrezonátor egyetlen módusával. Stark-eltolódások következtében az atomok között egy effektív kölcsönhatás jön létre, ami bizonyos feltételek mellett közelítőleg unitér időfejlődést jelent kizárólag az atomok rendszerét tekintve is. Ezen időfejlődés Hamilton-operátora a kollektív spin-operátorok egy négyzetes kifejezéseként írható, valamint a Dicke-állapotok bázisán egy diagonális mátrixnak felel meg.

Rámutattunk, hogy amennyiben teljes lokális kontrollal bírunk, ez a Hamilton-operátor univerzális kvantumlogikai hálózatok alapjául szolgálhat akár tetszőleges számú atom esetén. A tárgyalt elrendezésben teljes lokális kontroll szelektív, rezonáns lézerimpulzusokkal valósítható meg. A

legfölbbebb $N = 3$ atomos esetre receptet adtunk kvantumlogikai műveletek egzakt megvalósítására. Megadtuk a megfelelő univerzális CNOT kapuk kifejtését egy-kvantumbit műveletek és a kollektív időfejlődés szerint.

Az $N = 3$ atomos esetben, első lépésként a három-kvantumbites kölcsönhatásból két-kvantumbites kaput származtattunk, egy az újrafokuszáláshoz hasonló eljárást alkalmazva. A második lépésben ezt a kvantumkaput használtuk fel, az invariáns technika segítségével, a különböző CNOT kapuk megalkotására. A rendszer műveleti univerzalitásának nyomatékosítása érdekében tárgyaltuk a három-kvantumbites Toffoli-kapu egyszerűsített változatának előállítását.

Az utóbbi kvantum-logikai hálózatok megvalósítására tett javaslat egyik érdekessége, hogy noha az üregrezonátor jelenléte elengedhetetlen a működéséhez, annak veszteségeire csak csekély mértékben érzékeny. Nagyobb fotonveszteségi ráta mellett csak gyöngül a kvantumbitek közötti effektív csatolás, míg a dekoherencia nem növekszik számottevően. Jelentős dekoherencia-forrásnak egyedül a gerjesztett atomi állapot bomlási mechanizmusa marad. Tekintettel, viszont, a javaslatban szereplő atomi szerkezet egyszerűségére, az adott kísérleti körülményeket figyelembe véve könnyen lehet olyan változtatásokat tenni az elrendezésen, amivel ez a hatás is csaknem teljesen megszüntethető.

Tézisek

1. Bevezettük a kétmódusú elektromágneses tér állapotainak egy egyetlen komplex változójú függvényeket használó reprezentációját. Az ábrázolás $|\alpha\rangle|\alpha^*\rangle$ alakú kétmódusú koherensállapotok folytonos szuperpozícióján alapul. Ezért ezt a reprezentációt egykomplexsík koherensállapot-reprezentációnak neveztük. Megmutattuk, hogy létezik egy egy-egy leképezés a kétmódusú-összenyomott Fock-állapotok és a Laguerre-2D polinomok között. Ezt az eredményt felhasználva megmutattuk, hogy a kétmódusú elektromágneses tér minden állapota reprezentálható egy egyetlen komplex változós függvénnyel. [1, 2]
2. Optikai Schrödinger-macska állapotok kétmódusú általánosítására tettünk egy javaslatot. Kifejlesztettünk egy formalizmust nemortogonális bázisban megadott, tiszta állapotok kétrészű összefonódottságának kiszámítására, és a formalizmus segítségével kimutattuk, hogy a javasolt kétmódusú Schrödinger-macska állapotok általában összefonódtak. Szemléltetésül készítettünk egy teleportációs protokollt, amelyben a kvantumcsatornát egy kétmódusú Schrödinger-macska állapot alkotja. Tettünk egy javaslatot, ami alapul szolgálhat egy részleges Bell-mérés optikai megvalósításához, továbbá megmutattuk, hogy a javaslatot követve, egyidőben két kvantumbit feltételes teleportációja valósítható meg $1/8$ valószínűséggel. [3]
3. A mérés egy általános általános megközelítésében, a Sanov-tétel kvantum változatát használva megmutattuk, hogy az optikai Schrödinger-macska állapotok megkülönböztethetősége jobban megőrizhető ha a közvetlen környezetüket összenyomott állapotba tudjuk hozni. Egy jellemző helyzet, amikor a megkülönböztethetőségi probléma felmerül, az amikor egy döntési probléma determinisztikus kvantumalgoritmusának eredményét olvassuk ki. Numerikus eredményeinkre alapozva arra a következtetésre jutottunk, hogy létezik egy egyértelmű optimális beállítása a rendszer fázisviszonyainak, továbbá, hogy a Schrödinger-macska állapotok minden választásához és a dekoherencia minden erősségéhez létezik a környezetnek egy optimális összenyomottsági foka. [4]
4. Javaslatot tettünk egy potenciálisan skálázható, üregrezonátor kvantum-elektrodinamikáján alapuló kvantum-logikahálózat megvalósításra. A javasolt összeállítás N darab, kétmódusú üregrezonátorban csapdázott, négyállapotú atomból áll, amelyben minden atom, valamint

a rezonátor fotonja egy-egy kvantumbitét valósít meg. Megmutattuk, hogy univerzális kvantum-logikahálózat valósítható meg hasonló elven, mint a mag mágneses rezonanciáján alapuló kvantumszámítógép esetében. A működéshez szükséges egy-quantumbit műveletek végrehajtása az atomokon rezonáns Raman-impulzusokkal, az üregrezonátor terén pedig egy segéd-atommal lehetséges. Mivel a fotonikus kvantumbit a séma egyetlen kvantumbitje, ami a többivel kölcsönhatásban van, ezért az egy „optikai busz” szerepét tölti be. [5]

5. Javaslatot tettünk egy atomokból és diszperzív üregrezonátorból álló rendszeren alapuló kvantum-logikahálózat megvalósításra. Rámutattunk, hogy a rendszer műveletileg univerzális teszőleges számú atom esetén. Két és három atomos esetben CNOT kapuk egzakt megvalósítását származtattuk. A több-quantumbites kapukat a rezonáns lézerrimpulzusokkal megvalósított egy-quantumbites kapukból és az atomok közötti, üregrezonátor által keltett, kollektív kölcsönhatásból állítottuk össze. A javasolt rendszer hibatűrőképessége az üregrezonátor veszteségekkel szemben rendkívüli, márpedig általában ez a veszteség a dekoherencia legfőbb forrása az üregrezonátor kvantum-elektrodinamikáján alapuló elrendezésekben. A hibatűrőképesség egyik megnyilvánulása, hogy az üregrezonátor tere tetszőleges termális állapotban lehet, továbbá, hogy a veszteség növelésével a dekoherencia nem nő, hanem csak az atomok közötti effektív csatolási állandó csökken. [6]

Következtetések

Megmutattuk, hogy a koherens-állapotok még további alkalmazást találhatnak a kvantum-informatika területén. Bemutattunk egy csökkentett dimenziós ábrázolást, ami alkalmas összefonódott állapotok leírására, valamint jó alapot szolgáltatott optikai Schrödinger-macska állapotok kétmódusú általánosítására. Elemeztünk egy a környezet összenyomásán alapuló eljárást, amely koherens-állapot kvantumbitek dekoherenciájának csökkentésére alkalmas.

Két javaslat alapján megmutattuk az üregrezonátor kvantumelektrodinamikáján alapuló rendszerek alkalmazhatóságát univerzális kvantum-logikahálózatok megvalósítására. Az első javaslat jó skálázási tulajdonságokkal bír, a második jól kezeli a rezonátorveszteségek nehézségeit.

Kapcsolódó közlemények

- [1] József Janszky, Aurél Gábris, Mátyás Koniorczyk, András Vukics, and Péter Ádám, *Coherent-state approach to entanglement and teleportation*, Fortschr. Phys. **49**, 993 (2001).
- [2] József Janszky, Aurél Gábris, Mátyás Koniorczyk, András Vukics, and János Asbóth, *One-complex-plane representation: a coherent state description of entanglement and teleportation*, J. Opt. B **4**, S213 (2002).
- [3] József Janszky, János Asbóth, Aurél Gábris, András Vukics, Mátyás Koniorczyk, and Takayoshi Kobayashi, *Two-mode Schrödinger cats, entanglement and teleportation*, Fortschr. Phys **51**, 157 (2003).
- [4] Aurél Gábris, Péter Ádám, Mátyás Koniorczyk, and József Janszky, *Distinguishing Schrödinger cats in a lossy environment*, J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt. **6**, S84 (2004).
- [5] Aurél Gábris and Girish S. Agarwal, *Controlled-NOT gates for four-level atoms in a bimodal cavity*, Acta Physica Hungarica B: Quantum Electronics **23**, 19 (2005).
- [6] Aurél Gábris and Girish S. Agarwal, *Vacuum induced Stark shifts for quantum logic using a collective system in a high quality dispersive cavity*, Phys. Rev. A **71**, 052316 (2005).

További közlemények

- [7] Mátyás Koniorczyk, Zoltán Kurucz, Aurél Gábris, and József Janszky, *General optical state truncation and its teleportation*, Phys. Rev. A **62**, 013802 (2000).
- [8] Ágnes Cziráki, Imre Geröcs, Mercedesz Köteles, Aurél Gábris, Lajos Pogány, Imre Bakonyi, et al., *Structural features of the La-Sr-Fe-Co-O system*, Eur. Phys. J. B **21**, 521 (2001).
- [9] József Janszky, Mátyás Koniorczyk, and Aurél Gábris, *One-complex-plane representation approach to continuous variable quantum teleportation*, Phys. Rev. A **64**, 034302 (2001).
- [10] A. Gábris and G. S. Agarwal, *Quantum teleportation with pair-coherent states*, Int. Journal of Quant. Inf. **5**, 17 (2007).