

# Részletes szakmai beszámoló a T049234 számú OTKA pályázathoz

A projekt alapvetően a tervezett keretek között zajlott le. Tóth Géza OTKA posztdoktori ösztöndíjas 2006 február 1-én csatlakozott a projekthez. Ezt az OTKA iroda felé korábban jeleztük. A projekt eredeti határidejét — az OTKA Iroda egyetértésével — egy évvel meghosszabbítottuk.

A projekt eredményeinek tartalmi összefoglalása, témakörök szerint csoportosítva:

## 1. Koherens kontroll

Kötött elektronok kvantumállapotának koherens kontrollja rendkívül fontos eszköz a mai kísérleti fizikában. Ezen kontrollmechanizmusok révén a kvantuminterferenciát kihasználva számos kvantumos jelenséget fedeztek fel, melyek alapján a kísérleti fizikában és a mindennapi életben is hasznos alkalmazásokat dolgoztak ki. Bizonyos alkalmazások megkövetelik, hogy a rendszer kvantumállapotát nagy pontossággal, a kontrollfolyamat nehezen szabályozható paramétereitől függetlenül kontrolláljuk. Ilyen például a molekulák orientációjának beállítása, molekulák rezgési hullámcsomagjának preparálása, atomi elektronhéj kvantumállapotának preparálása pl. spektroszkópiai mérés előkészítésére, mezoszkópikus és nano-méretű néhány elektronos rendszerek kvantumállapotának kontrollja. A felsorolt példákban az elektronok kvantumállapotát fénnel kontrollálják. Azonban a fény és atomok szerepe felcserélhető: egy dielektrikumban terjedő fényimpulzus, mely frekvenciája közel rezonáns a dielektrikumot alkotó atomok valamely átmeneti frekvenciájával erősen kölcsönhat az atomokkal és általában elnyelődik. Viszont ha két közel rezonáns fényimpulzus van jelen a közegben, akkor számos konfiguráció ismert, melyekben az impulzusok elnyelődés nélkül terjednek, s a terjedés során például új frekvenciájú impulzust keltenek. Kiemelkedően fontos alkalmazás a koherens optikai memória, melyben egy néhány fotonos impulzust a közeg koherensen "elnyel" egy erős kontrolláló impulzus hatására. Az atomi koherenciákba beírt információt pedig később egy erős kiolvasó tér alkalmazásával újból fényimpulzussá lehet alakítani. Ezekben az alkalmazásokban az a közös, hogy egy dielektrikum szuszceptibilitását fénnel kontrolláljuk, s ezáltal befolyásoljuk egy másik fényimpulzus terjedését, tehát "fényt kontrollálunk fénnel".

Az OTKA projekt keretében egy három-szintű, degenerált energianívójú atomi rendszerre terjesztettük ki a jól ismert stimulált Raman adiabatikus átmenet (stimulated Raman adiabatic passage - STIRAP) folyamatot. A rendszer kezdetben egy  $J=0$  szinten helyezkedik el, a gerjesztett állapotban  $J=1$ , míg a metastabil végállapotban  $J=2$ . Az a célunk, hogy a  $J=2$  szinten koherens szuperponált állapotot hozzunk létre robosztus módon az alábbi megkötések mellett:

1. A felső gerjesztett ( $J=1$ ) szint betöltöttsége legyen minimális a folyamat során.
2. A végállapot csak gyengén függjön az alkalmazott impulzusok területétől, elhangolásától, időzítésétől.
3. Legyen Doppler-eltolódástól független a végállapot.
4. Ha csak  $\sigma_+$  és  $\sigma_-$  polarizációjú fény gerjeszti a rendszert akkor a végállapot a  $M=-2,0,2$  alnívók koherens szuperpozíciója.
5. Ha  $\sigma_+$ ,  $\sigma_-$ , és  $\pi$  polarizáció impulzusain vannak akkor a végállapot az  $M=-2,-1,0,+1,+2$  alnívók szuperpozíciója.

Végül választ kellett találnunk arra a kérdésre, hogy a fenti feltételek teljesülése mellett a végállapot tér mekkora része fedhető le a fényimpulzusok paramétereinek változtatása mellett.

A közölt cikkben megmutattuk, hogy lehet STIRAP folyamatot implementálni a fenti degenerált rendszerben. A folyamat kielégíti az 1-5 követelményeket. A végállapot pedig lefedi a teljes Hilbert teret, azaz  $\sigma_+$  és  $\sigma_-$  polarizációjú impulzusok alkalmazása esetén a teljes  $M=-2,0,+2$  teret, míg  $\sigma_+$ ,  $\sigma_-$  és  $\pi$  polarizációjú impulzusok alkalmazása mellett a  $M=-2,-1,0,+1,+2$  teret. [1]

A fenti rendszert később alkalmaztuk elliptikus polarizációjú fényimpulzus terjedésének kontrollálására.

## 2. Kvantumos bolyongás

### Összefonódottság viselkedése kvantumos bolyongásban

Kvantumos véletlen bolyongás esetén vizsgáltuk az összefonódottság viselkedését. Passzív optikai hálózatokban terjedő foton esetén megadtuk hogyan lehet előírt párösszefonódottságot megvalósítani és felső korlátot adtunk az elérhető maximumra is. [2]

Két, nemkölcönható részecske kvantumos bolyongását vizsgáltuk egy egyenesen, különös tekintettel a találkozás valószínűségére. Analitikusan meghatároztuk a találkozási valószínűséget bozon és fermion részecskékre, aszimptotikusan. A klasszikus bolyongó részecskék esetével összehasonlítva megállapítottuk, hogy a találkozási valószínűség a kvantumos esetben gyorsabban csökken, de nem kvadratikusan. Az összefonódott kezdőállapotok módosítják a találkozási valószínűséget, ami megjelenik a találkozási valószínűség nemklasszikus oszcillációjában. [3]

### Kvantumos bolyongás Pólya-féle száma

Általánosítottuk a visszatérési valószínűség (Pólya-féle szám) fogalmát  $d$  dimenziós, kiegyensúlyozott kvantumos véletlen bolyongás esetére. Levezettünk egy elégséges feltételt a bolyongás visszatérő voltára az időfejllesztő operátort nyeregponthoz közelítve. Az eljárás során egy másik feltételt is találtunk, amely a bolyongás lokalizációjára vonatkozik. Ez utóbbira példát eddig numerikusan találtak és csupán egyes speciális esetekben volt ismert analitikus feltétel. A klasszikus véletlen bolyongástól eltérően, ahol a Pólya-szám az adott dimenzióra jellemző, kvantumos véletlen bolyongásnál a visszatérési valószínűség általában függ a bolyongás topológiájától, az érmeoperátor megválasztásától és a kezdőállapottól. Ezzel lehetővé válik, hogy a kezdőállapot megváltoztatásával a bolyongást visszatérőből tranzitívá (azaz véges valószínűséggel elszökővé) változtassuk. [4]

Alkalmaztuk a Pólya-féle szám általunk adott általánosítását kvantumos bolyongásokra. Számos példán keresztül mutattuk be a klasszikustól alapvetően eltérő visszatérési tulajdonságokat. Először megmutattuk, hogy 1D Hadamard érmék tenzorszorzataként felírható érmeoperátorok esetén a kvantumos bolyongás Pólya-féle száma független a kezdőállapottól, és a rács dimenziója egyértelműen meghatározza, hasonlóan a klasszikus esethez. Közelítést adtunk az ilyen típusú bolyongások Pólya-féle számára. Másodszer a 2D Grover-féle érmeoperátor általánosításával olyan bolyongásokat konstruáltunk, amelyek tetszőleges dimenzióban visszatérőek lehetnek, a kezdőállapotok egy alterének kivételével. Harmadszer a 2D Fourier-érmés bolyongásra közelítőleg megadtuk a Pólya-féle szám értékét a kezdőállapot paramétereinek függvényében. [5] Végül elemeztük a definícióban alkalmazott mérés gyakoriságának hatását. Megtaláltuk, hogy a sűrűn végzett, pontos mérések milyen határesetben vezetnek vissza a klasszikus bolyongásra. [6]

Megadtuk az 1D aszimmetrikus kvantumos bolyongás Pólya-féle számának viselkedését általános esetben. Kiderült, hogy a klasszikusan instabil visszatérő tulajdonság a kvantumos esetben stabilá válik. Sikerült megadnunk a stabilitási tartományt is. [7]

Módosításokat dolgoztunk ki a hiperkocka kvantumos bolyongáson alapuló keresőalgoritmus hatékonyságának javítására. A módosításokkal növelhető a keresési algoritmus sikerének valószínűsége, illetve csökkenthető a teljes várható futási ideje, valamint az órákulumhívások száma. Rámutattunk, a kidolgozott módosításokkal a hiperkocka kvantumos bolyongásos keresése az órákulumhívások számát tekintve optimális kvantumalgoritmus. [8]

## Kvantumos bolyongás kísérleti megvalósítása fotonokkal

Kidolgoztuk a kvantumos véletlen bolyongáson alapuló keresési algoritmus passzív lineáris optikai hálózattal történő megvalósítását. A fotonveszteségek irány szerinti eloszlását tanulmányozva megmutattuk, hogy az azonos átlagveszteséggel jellemezhető uniform eloszlásból származóhoz képest a keresés hatékonyságága javulást mutat, ha az eloszlás uniformitása sérül. Numerikus eredményeink azt mutatták, hogy bizonyos esetekben, a fotonveszteségek pusztán növelésével is javulás érhető el. Felhasználva, hogy a lineáris optikai megvalósításban a klasszikus véletlen bolyongás határesetére elérhető a fázisfluktuációk növelésével, megmutattuk, hogy a kvantumos véletlen bolyongáson alapuló keresési algoritmus klasszikusan elveszíti keresésjellegét. Ugyanakkor, numerikus eredményeink azt mutatták, hogy statikus, vagy nagyon lassan változó fáziszaj esetén az átlagos megtalálási valószínűség időben aszimptotikusan egy a zaj erősségétől függő, nem nulla értékhez tart. [9]

Részt vettünk egy kvantumoptikai kísérlet megvalósításában, melyben elsőként demonstráltuk egy polarizált foton kvantumos bolyongását. Korábban, csak két esetben volt példa kvantumos bolyongás sikeres megvalósítására. Kísérletünkben a kvantumos bolyongás érmeterét a foton polarizációjának feleltettük meg, a bolyongó helyzetét pedig a foton beérkezése idejének. A kísérleti elrendezés alapelve, amelyet a kvantumos bolyongás eltolás operátorának feleltettünk meg, egy szelektív optikai késleltető, amely a függőlegesen polarizált fotonokat 5 ns-mal késlelteti a vízszintesen polarizáltakhoz képest. A kísérletben érmeoperátorok széles osztályát valósítottunk meg  $\lambda/2$  lemezek megfelelő forgatásával, ám fázistolók további alkalmazásával tetszőleges érmeoperátor is megvalósítható. A kvantumos bolyongás ismételt iterációit egy optikai visszacsatolás hozzáadásával oldottuk meg, melynek eredményeképpen a kapott rendszer egy optikai interferométer. Az interferometrikus elrendezés különös előnye, hogy az igényelt kísérleti erőforrások mértéke csaknem független a megvalósítandó kvantumos bolyongás lépéseinek számától. [10]

## Kvantumos bolyongás kvantumgyűrűkkel

Az egydimenziós kvantumos bolyongást elektronoknak félvezető spintronikai kvantumgyűrűk kétdimenziós hálózatán történő transzportja révén javasoltuk megvalósítani. Ebben a rendszerben az érme szabadsági fokot az elektron spinje képviseli, míg a bolyongó diszkrét pozíciójának a hálózat egyik dimenziója menti gyűrűk címkéje felel meg. Az általunk javasolt elrendezésben a gyűrűkben Rashba-féle spin-pálya kölcsönhatás van jelen, melynek erőssége külső elektromos térrel hangolható. A rendszer geometriája és az egyes gyűrűkbeli, megfelelő értékű spin-pálya kölcsönhatás erősségek biztosítják az érmedobás (azaz spin-forgatás), valamint a lépésoperátor megvalósítását. [11]

## Qubitek kaotikus dinamikája

Qubitek iteratív, feltételes dinamikáját tanulmányoztuk, ahol a feltételt egy részrendszeren való mérés eredménye adja. Ilyen esetben a sokaság dinamikája nemlineárisra válhat. Megmutattuk, hogy már egy qubitből álló rendszerekben is kaotikus viselkedés jelenik meg. A dinamika leírható egy komplex, nemlineáris leképezéssel, amelynek egy paramétere van. Eltérően a szokásos kvantumkáosztól, a kezdeti feltételekre az időfejlődés exponenciális érzékenységet mutat az általunk talált komplex kvantumkáosz esetén. Analitikusan kiszámítottuk a kvantumállapotok átfedésével definiált Ljapunov exponenst, és megmutattuk, hogy pozitívvá válhat. A dinamikának a kezdőállapottól és a paramétertől való függését numerikus módszerekkel vizsgáltuk. Megadtuk a különböző stabil periodikus ciklusokhoz tartozó paraméterek halmazát. [12, 13]

Alkalmazásként egy konkrét példán keresztül bemutattuk, hogyan módosul egy állapotstíztítási protokoll viselkedése a stabil tartományon kívül és a rövid metastabil szakasz után hogyan válik kaotikussá. [14]

### 3. Összefonódottság kvantuminformaticai rendszerekben

#### Kvantumkommunikációs sémák

A kvantuminformatica egyik fontos alapkérdése a kvantuminformáció továbbításának erőforrásigénye, azaz hogy milyen mértékű összefonódottság, illetve klasszikus kommunikáció szükséges az adatátvitelhez. Az ún. távoli állapotelőállítás esetén kevesebb klasszikus kommunikáció szükséges, mint a kvantumteleportáció során, azonban az előállítható állapotok halmaza is korlátozott. Megmutattuk, hogy bizonyos feltételek mellett ez a halmaz egy  $D-1$  dimenziós valós sokaság a  $D$  komplex dimenziós állapotterben, és a távoli állapotelőállításhoz szükséges erőforrás mértéke  $\log_2 D$  klasszikus bit, a teleportációhoz szükséges mennyiség fele. A módszert kiterjesztettük végtelen dimenziós állapotterekre is [17], különös tekintettel a kvantumoptikai eszközökkel való megvalósíthatóságra. Ez esetben az összefonódott erőforrás a kétmódusú összenyomott vákuum, és az egymódusú fény állapotainak egy valós függvénnyel paraméterezett családja állítható elő, miközben csupán egyetlen valós számot kell klasszikus módon továbbítani. Módszerünk a klasszikus Vernam-kódolás folytonos kvantumrendszerekre történő általánosításának is tekinthető [16].

Megadtuk egy általános feltételét annak, hogy egy torzításmentes távoli állapotelőállítási séma „feledékeny” (oblivious) legyen, azaz a klasszikus üzenet nem tartalmaz információt a bemenetről [18]. Az ilyen sémák titkosított adatátvitelre, illetve térben megosztott kvantumszámításoknál használhatók. A feledékenység szükséges és elégséges feltétele, hogy a küldő általánosított (POVM) mérését jellemző pozitív operátorok az előállítandó állapot teljesen csillag-kopozitív függvényei legyenek. Ez antilineáris analógja az állapottranszformációknál szokásos teljesen pozitív tulajdonságnak. A tiszta állapotokon alapuló sémáknál ez a feltétel azt jelenti, hogy a mérés sajátállapotai antilineáris függvényei a célállapotnak.

A kvantum kommunikációs csatornák egyik csoportja a kvantum privát csatornák, amelyek egy kvantumállapot titkosított továbbítására alkalmasak klasszikus véletlen kulcs segítségével. Kvantumbitek esetén ilyen a Pauli csatorna, ahol a kódoló operátorok az egységoperátor és a Pauli operátorok, egyenletes eloszlású véletlen kulcs szerint alkalmazva. A csatorna a lehallgatás szempontjából biztonságos ugyan, de az üzenet kvantumállapot determinisztikus módosítható, amely szintén támadási lehetőség. Ezt a sérülékenységet elemeztük kvantitatíve, entrópia átlagok segítségével. Megmutattuk, hogy a csatorna védettebbé tehető további kódoló operátorok bevezetésével, melyek optimálisan választhatók. [19]

#### Kollektív kvantummemória spinrendszerekben

Nagy számú azonos atomból álló sokaságban az elektromágneses sugárzási térrel való kölcsönhatás kis számú kollektív szabadsági fokra koncentrálódik (kollektív erősítés). Ezért az ilyen sokaságok ígéretes alapelemek lehetnek kvantummemóriákban és fény-anyag interfészekben. Ennek kapcsán egy általánosított elméleti modellben vizsgáltuk, miként lehet tárolni a fény folytonos változós kvantumállapotát az atomok elektronszerkezetének kollektív gerjesztéseiben. Kidolgoztunk egy egységes leírást, amely segítségével összehasonlítottunk három különböző sémát: a Faraday-forgatáson, mérésen és visszacsatoláson alapuló, rezonanciától távoli kétfotonos Raman-átmeneten alapuló, illetve az elektromágnesesen indukált átlátszóság (EIT) jelenségén alapuló [20].

Szilárdtestekben is elképzelhető hasonló elven működő kollektív kvantummemória. Elvben lehetséges a kvantuminformáció tárolása magspin sokaságában, amik egy félvezető kvantumpontra alkotnak. A magok mágneses momentumai ez esetben nem az elektromágneses sugárzási térrel, hanem a kvantumpontra lévő többletelektron spinjével az inhomogén hiperfinom csatolás révén hatnak kölcsön. Megvizsgáltuk a kvantumbitek tárolásának lehetőségét egy ilyen rendszerben, és javaslatot tettünk egy olyan elrendezésre, amelyben a számítási bázist alkotó kollektív magspinállapotok energetikailag elkülönülnek a többi spinállapottól, s ezáltal a kvantumbitre gyakorolt dekoherenciahatások csökkenthetők. Megmutattuk, hogy a hiperfinom csatolás inhomogén mivolta miként befolyásolja a

kvantummemória működését, és kitértünk a véges hőmérséklet hatásaira is [21].

## Összefonódottság spinláncokban

Sokrészű rendszerekben a részrendszer-párok összefonódottsága nem lehet tetszőleges. Kvantumbitek egydimenziós végtelen láncával foglalkoztunk. Célunk a legközelebbi kvantumbitek maximális pár-összefonódottságának meghatározása volt translációinvariáns állapotokra. Numerikus optimalizálást végeztünk a végesen korrelált állapotok halmazán. Ezek a végtelen spinláncnak olyan matematikailag jól definiált állapotai, ahol egy kiválasztott véges részrendszernek a rendszer többi részével való korrelációit egy véges virtuális rendszerrel való korrelációkkal modellezhetjük. Olyan kvantumállapotokat találtunk, amelyekben a legközelebbi szomszédok összefonódottsága közelítőleg azonos az irodalomból ismert, sejtésként megadott maximális értékkel. Megmutattuk, hogy ebben az esetben a legközelebbi szomszédok kvantumállapota közelítőleg maximálisan összefonódott kevert állapot (MEMS), és részletesen elemeztük az állapot további összefonódottsági tulajdonságait. [22]

## A dekoherencia mikroszkópikus modelljei

A dekoherencia mikroszkópikus modelljei a jelenség jobb megértését szolgálják a kvantumoptika és a kvantuminformatika keretében. Veszteséges optikai szálakat például majdnem transzparens nyalábosztók sorozatával szokás modellezni. Ennek mintájára megvizsgáltuk, hogy a kvantumbit milyen típusú dekoherenciája szimulálható kontrollált U kapuk ismételt alkalmazásával, ami egy alapvető két kvantumbites kölcsönhatás. Megvizsgáltuk, miként valósítható meg egy kvantumbit markovi időfejlődésének generátora kontrollált unitér kapuk segítségével, illetve a kvantumteleportáció protokoll egy speciális alkalmazásával. Megmutattuk, hogy ilyen módszerekkel tetszőleges unitális dinamikát eredményező környezet szimulálható. [23]

Vizsgáltuk továbbá a dekoherenciát félkvantumospingázokban. Ezek olyan modell rendszerek, amelyekben klasszikus részecskék mozognak valamilyen (esetlegesen sztochasztikus) dinamika szerint. A részecskékhez egy-egy kvantumbitet is rendelünk, amelyek akkor kerülnek kölcsönhatásba, ha a két megfelelő klasszikus részecske ütközik. Megmutattuk, hogy ilyen rendszerekben kvantumhomogenizáció áll be, függetlenül a klasszikus dinamika jellegétől, és elemeztük az összefonódottság viselkedését is. [24]

## Összefonódottság detektálása

Meghatároztuk az összes spin-varianciákkal felírható összefonódottság kritériumot. Ezek lehetővé teszik, hogy a kollektív spin-koordináták és varianciájuk mérésével összefonódottságot detektáljunk olyan sokrészecskés rendszerekben, ahol minden részecskének  $1/2$ -es spinje van [25, 26, 27]. A kritériumok egyikét már kísérletekben is felhasználták [28, 29, 30]. A fotonokkal végzett, parametrikus lekonverzió (parametric down-conversion) és poszt-szelekción alapuló kísérletben négy-qubites szimmetrikus Dicke állapotot hoztak létre. Érdekes tanulmányozni az általunk meghatározott kritériumok és az eddig ismert kritériumok viszonyát. Utóbbiak az általunk meghatározott kritériumok speciális esetei.

Egy másik kísérletben 6-qubites Dicke állapotot állítottak elő [31, 32]. Ehhez rezonátort és nagyobb teljesítményű lézert kellett alkalmazni, mivel a posztszelekció miatt a kísérlekenek csak egy kis töredéke sikeres. A kísérlethez kapcsolódva általános módszereket dolgoztunk ki az összefonódottság detektálásához 8-10 qubites rendszerekhez. Az összefonódottság detektálása mellett ezekkel azt is becsülni lehet, mennyire sikerült a kívánt állapotot megvalósítani (fidelity). A módszerek olyanok, hogy minél kevesebb mérést igényeljenek. Ezzel akár tízszer rövidebb ideig tarthat egy kísérlet, mint az eddig ismert módszerekkel.

Az összefonódottság detektálásáról készült áttekintő cikkünk jelentős részben az utóbbi években ezen a területen végzett kutatásainkra épül [33]. Egy másik összefoglaló cikkünk magyar nyelven jelent

meg [34]. A kvantuminformációhoz szükséges számításokat segítő programcsomagot fejlesztettünk ki [35].

Megmutattuk, hogy szimmetrikus kétrésű rendszerekben számos összefonódottsági kritérium egybeesik [36, 37]. Azt is megmutattuk, hogy vannak szimmetrikus kötött összefonódott (bound entangled) kvantumállapotok már igen kis rendszerekre is (két qutrit). Eddig kötött összefonódottság csak nonszimmetrikus rendszerekben volt ismert, sőt feltételezték, hogy a szimmetria hiánya egy előfeltétele ennek az összefonódottságnak.

Foglalkoztunk az összefonódottság detekciójával általános, nonszimmetrikus rendszerekben is. Megmutattuk, hogy az ún. Computable Cross Norm - Realignment kritériumnál erősebbek az operátorbizonytalanságokon alapuló technikák. [38]

## 4. Kvantuminformáció kezelése semleges atomokkal

Atomok belső elektronállapotai a kvantuminformáció egységét, a kvantum-bitet hordozó alkalmas fizikai rendszert testesítenek meg. Az alapállapot hiperfinom felhasadásával kapott állapotok a környezettel gyengén hatnak kölcsön, a spontán élettartamuk rendkívül hosszú, a gyakorlati alkalmazások szempontjából végtelen. Koherens lézerterekkel az egybites forgatási műveletek könnyen megvalósíthatók, például két lézerpulzussal rezonáns vagy adiabatikus Raman átmenet is gyorsan végrehajtható. Az univerzális két-bites műveletek elvégzéséhez valamilyen atom-atom kölcsönhatást kell igénybe venni. Erre elvileg többféle lehetőség van: ilyen a hiperfinom állapotra érzékeny atom-atom ütközések felhasználása, vagy egy erősen csatolt rezonátor tér által közvetített, rezonáns sugárzási atom-atom kölcsönhatás. Mindkét megközelítés azonban szükségessé teszi a kvantum-bitet hordozó atomok kontrollált pozicionálását és mozgatását. Ez a semleges atomokon alapuló kvantuminformáció-kezelés fő megoldatlan problémája, amellyel az OTKA kutatás keretében mi is foglalkoztunk.

### Atomok translációs mozgásának szabályozása erősen csatolt optikai terekben

Kidolgoztunk egy hiperfinom szerkezetre érzéketlen csapdázási mechanizmust, melynek segítségével egy optikai dipólcspadában az atomok a hullámhossz tizedének megfelelő térfogatban akár másodpercekig lokalizálhatók [40]. A rezonátoros hűtés módszerét [43] vizsgáltuk a nagy elhangolás határesetben, ahol a különböző hiperfinom nívókat már nem oldja fel a sugárzási tér. Bebizonyítottuk, hogy a frekvenciák finomhangolásával a csapdázó optikai potenciált szolgáltató rezonátoros térben az intenzitás növelésével kompenzálható a nagy elhangolás miatt csökkenő kölcsönhatási erősség, és a fotontér dinamikájának késleltetéséből származó hűtési hatás konstans értéken tartható. Azóta Rb atomok hosszú idejű csapdázását ezen az elven kísérletileg is kimutatták Prof. G. Rempe csoportjában (Max-Planck Institut, Garching). A nagy elhangolások tartományában működő hűtési mechanizmust átültettük egy teljesen más geometriára, ahol az atom egy optikai hullámvezetőben két transzverzális dimenzióban bezárt, a harmadik longitudinális dimenzióban szabadon terjedő sugárzási mezővel hat kölcsön [47] (optikai rezonátorokban a tér mindhárom irányában be van zárva a sugárzási mező).

A fent leírt hűtési és csapdázási módszerrel elvileg a csapdázási frekvenciával összemérhető, alacsony hőmérsékletek érhetők el (az előbbi a Planck állandóval, az utóbbit a Boltzmann állandóval szorozva mindkettőt energiaként fejezhetjük ki). Ekkor már az atomok tömegközépponti mozgásában felbukkanhatnak a kvantáltság jelei. Ezért a kvantumtrajektória-módszerrel elvégeztük az atom mozgásának, optikai hűtésének és csapdázásának teljesen kvantumosan leírását [39]. Ebből a munkából azóta egy nagyszabású programcsomag készült (C++QED, [44]), amelyet egyéb problémák vizsgálatában is hasznosítunk.

### Atom-atom kölcsönhatás erősen csatolt terekben

Sokatomos rendszerekben, az atomok között a távolra elhangolt sugárzási tér által közvetített kölcsönhatás miatt bekövetkező jelenségeket vizsgáltunk. Kollektív viselkedésen alapuló hűtési mecha-

nizmust fedeztünk fel: egy lineáris optikai rezonátorba helyezett homogén atomfelhő a rezonátor tengelyére merőleges irányban, távolra hangolt CW lézerrel gerjesztve a lézerintenzitás egy küszöbértéke felett kristályszerű, periodikus struktúrába szerveződik, amelyet a pumpáló lézerből a rezonátor terébe szórt fotonok kötnek meg [41, 42]. Az átmenet egy nemegyensúlyi fázisátalakulás. Messze a küszöbintenzitás felett kialakuló stacionárius állapotban az atomok az állóhullámú tér duzzadóhelyeinek kis környezetében lokalizálódnak. Az elérhető atomsűrűség elegendően nagy, amely lehetővé teszi a kvantuminformáció atomi sokaságban való reprezentálására kidolgozott sémák megvalósítását. Ugyanakkor felmerül annak a lehetősége, hogy az indukált polarizáció miatt kialakuló rezonáns dipól-dipól kölcsönhatás miatt az atomfelhő instabillá válik. Ezért elvégeztük a nagy optikai sűrűségű atomok gázának stabilitás-vizsgálatát a dipól-dipól kölcsönhatás figyelembe vételével [50]. A feladat érdekessége, hogy ez a kölcsönhatás térben anizotróp.

Megvizsgáltuk egy optikai rezonátor által kiválasztott móduson keresztül közvetített atom-atom kölcsönhatást abban a határesetben, amikor a rezonátor módus tere kvantumos (néhány foton). Megmutattuk, hogy a korábban felfedezett önszerveződés jelenségének dinamikájában lényegileg megjelennek a kvantumhatások [48]. Egyrészt az önszerveződés tranzienst folyamata összefonódott állapotot keresztül megy végbe. Másrészt a tranzienst lefutása érzékeny az atomok kvantumstatisztikájára is, az atomokat szuperfolyékony és Mott szigetelő állapotokból indítva az önszerveződésre lényegesen eltérő időállandót kaptunk.

Optikai rezonátorba helyezett, az atomok rezonanciájától távolra hangolt sugárzási térrel kölcsönható Bose-Einstein kondenzátumot vizsgáltunk. Csatolt, nemlineáris parciális differenciálegyenletek numerikus megoldásával meghatároztuk a kölcsönható rendszer stabil átlagtér megoldásait. Lineáris algebra csomag (LAPACK) segítségével kiszámoltuk az átlagtér körüli gerjesztések spektrumát. Kiszámoltuk a kvantumfluktuációk okozta kiürülését a kondenzátumnak, és kritikus rendszerben analitikusan megadtuk a kiürülés kritikus pont körüli szinguláris viselkedését. Az instabil rezonátorokban megfigyelhető „excess noise” jelenséggel analóg hatásra bukkantunk: a kondenzátum és rezonátor közötti kölcsönhatás gyenge (eltűnő) csatolásának határesetében, mindenféle kritikus viselkedéstől távol, a kondenzátum nagyon nagy kiürülését találtuk a stacionárius állapotban [52].

## 5. Kvantumtrajektória módszerek továbbfejlesztése

Eljárást dolgoztunk ki nyílt kvantumrendszerek időfejlesztő operátorának sztochasztikus operátorösszeg reprezentációban történő meghatározására. Az adott fizikai folyamat a kezdőállapottól függetlenül jellemezhető, így egyszerre nagyszámú kiindulási állapot időfejlesztése oldható meg hatékonyan - a kiindulási állapotok alterének dimenziójával arányosan rövidebb idő alatt, mintha külön-külön tekintenénk a kiinduló állapotok fejlődését. Tetszőleges kvantumtrajektória módszer, beleértve a nem-markovi rendszerekre kidolgozottakat is, választható az időfejlesztés alapjául. A módszer előnyeit és működési elvét egy üregrezonátorba zárt kétatomos rendszerrel megvalósított kontrollált-nem kapun mutattuk be. [53]

## Hivatkozások

- [1] Z. Kis, N. V. Vitanov, A. Karpati C. Barthel and K. Bergmann:  
Creation of arbitrary coherent superposition states by stimulated Raman adiabatic passage,  
Phys. Rev. A 72, 033403 (2005).
- [2] J. Novotný, M. Štefaňák, T. Kiss, I. Jex:  
Control of entanglement in Ising-type networks with one and two excitations  
J. Phys. A: Math. Gen. 38, 9087-9103 (2005).

- [3] M. Štefaňák, T. Kiss, I. Jex and B. Mohring:  
The meeting problem in the quantum walk  
J. Phys. A: Math. Gen. 39, 14965-14983 (2006).
- [4] M. Štefaňák, I. Jex and T. Kiss:  
Recurrence and Pólya number of quantum walks  
Phys. Rev. Lett. 100, 020501 (2008).
- [5] M. Štefaňák, T. Kiss and I. Jex:  
Recurrence properties of unbiased coined quantum walks on infinite d-dimensional lattices  
Phys. Rev. A 78, 032306/1-12 (2008).
- [6] T. Kiss, L. Kecskés, M. Štefaňák and I. Jex:  
Recurrence in coined quantum walks  
Phys. Scr. T 135, 014055 (2009).
- [7] M. Štefaňák, T. Kiss and I. Jex:  
Recurrence of biased quantum walks on a line  
New J. Phys. 11, 043027 (2009).
- [8] V. Potoček, A. Gábris, T. Kiss, I. Jex:  
Optimized quantum random-walk search algorithms on the hypercube,  
Phys. Rev. A 79, 012325 (2009)
- [9] A. Gábris, T. Kiss and I. Jex:  
Scattering quantum random-walk search with errors  
Phys. Rev. A 76, 062315 (2007).
- [10] A. Schreiber, K. N. Cassemiro, V. Potoček, A. Gábris, P. Mosley, E. Andersson, I. Jex, Ch. Silberhorn:  
Photons Walking the Line: A Quantum Walk with Adjustable Coin Operations,  
Phys. Rev. Lett (elfogadva), 2010
- [11] O. Kálmán, T. Kiss and P. Földi:  
Quantum walk on the line with quantum rings  
Phys. Rev. B 80, 035327 (2009).
- [12] T. Kiss, I. Jex, G. Alber, and S. Vymětal:  
Complex chaos in the conditional dynamics of qubits  
Phys. Rev. A 74, 040301R (2006).
- [13] T. Kiss, I. Jex, G. Alber and E. Kollár:  
Properties of complex chaos in conditional qubit dynamics  
Int. J. Quant. Inf. 6 Suppl., 695-700 (2008).
- [14] T. Kiss, I. Jex, G. Alber and S. Vymětal:  
Complex chaos in conditional qubit dynamics and purification  
Acta Phys. Hung. B, 26, 229-235 (2006).
- [15] Z. Kurucz, P. Adam, J. Janszky:  
Simulating Measurement Statistics in Remote State Preparation,  
Acta Phys. Hung. B: Quant. El. 23, 49-54, (2005).
- [16] Z. Kurucz, P. Adam, J. Janszky:  
Remote state preparation in quadrature basis,  
Acta Phys. Hung. B: Quant. El. 26, 319-326, (2006).



- [17] Z. Kurucz, P. Adam, Z. Kis, J. Janszky:  
Continuous variable remote state preparation,  
Phys. Rev. A 72, 052315, (2005).
- [18] Z. Kurucz, P. Adam, J. Janszky:  
General criterion for oblivious remote state preparation,  
Phys. Rev. A 73, 062301, (2006).
- [19] J. Bouda, M. Koniorczyk and A. Varga:  
Random unitary qubit channels: entropy relations, private quantum channels and non-malleability  
Eur. Phys. J. D 53, 365 (2009).
- [20] Z. Kurucz, M. Fleischhauer:  
Continuous-variable versus electromagnetically-induced-transparency-based quantum memories,  
Phys. Rev. A 78, 023805, (2008).
- [21] Z. Kurucz, M. W. Sorensen, J. M. Taylor, M. Fleischhauer, M. D. Lukin:  
Qubit Protection in Nuclear-Spin Quantum Dot Memories,  
Phys. Rev. Lett. 103, 010502, (2009).
- [22] H Hiesmayr, M. Koniorczyk, Narnhofer:  
Maximizing nearest-neighbor entanglement in finitely correlated qubit chains,  
Phys. Rev. A **73**, 032310/1-11, (2006).
- [23] M. Koniorczyk, V. Buzek, P. Adam: Simulation of generators of Markovian dynamics on programmable quantum processors,  
Eur. Phys. J. D 37, 275, (2006).
- [24] M. Koniorczyk, Á. Varga, P. Rapcan, V. Buzek:  
Quantum homogenization and state randomization in semiquantal spin systems,  
Phys. Rev. A 77, 052106, (2008).
- [25] G. Tóth, C. Knapp, O. Gühne, and H.J. Briegel:  
Spin squeezing and entanglement,  
Phys. Rev. A 79, 042334 (2009); arxiv:0806.1048.
- [26] G. Tóth, C. Knapp, O. Gühne, and H.J. Briegel:  
Generalized spin squeezing criteria: Entanglement detection with collective measurements,  
Proceedings of QCMC08, Calgary, Canada; AIP Conf. Proc. 1110, 41 (2009).
- [27] G. Tóth, C. Knapp, O. Gühne, and H.J. Briegel:  
Optimal spin squeezing inequalities detect bound entanglement in spin models,  
Phys. Rev. Lett. 99, 250405 (2007); quant-ph/0702219.
- [28] N. Kiesel, C. Schmid, G. Tóth, E. Solano, and H. Weinfurter:  
Experimental Observation of Four-Photon Entangled Dicke State with High Fidelity,  
Phys. Rev. Lett. 98, 063604 (2007); quant-ph/0606234.
- [29] G. Tóth:  
Detection of multipartite entanglement in the vicinity of symmetric Dicke states,  
J. Opt. Soc. Am. B 24, 275 (2007), Feature issue on optical quantum information processing, Eds.  
B. Sanders, A. Zeilinger, and Y. Yamamoto; quant-ph/0511237.

- [30] C. Schmid, N. Kiesel, W. Laskowski, E. Solano, G. Tóth, M. Zukowski, and H. Weinfurter:  
The Entanglement of the Symmetric Four-Photon Dicke State,  
p. 113 in book: QUANTUM COMMUNICATION AND SECURITY, M. Zukowski, S. Kilin, and  
J. Kowalik (Eds.), Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Quantum Com-  
munication and Security, Gdansk, Poland, 10-13 Sept. 2006 IOS Press (ISBN 978-1-58603-749-9),  
Netherlands, 2007.
- [31] W. Wieczorek, R. Krischek, N. Kiesel, P. Michelberger, G. Tóth, and H. Weinfurter:  
Experimental entanglement of a six-photon symmetric Dicke state,  
Phys. Rev. Lett. 103, 020504 (2009), arxiv:0903.2213.
- [32] G. Tóth, W. Wieczorek, R. Krischek, N. Kiesel, P. Michelberger, and H. Weinfurter:  
Practical methods for witnessing genuine multi-qubit entanglement in the vicinity of symmetric  
states,  
New J. Phys. 11, 083002 (2009); arxiv:0903.3910.
- [33] O. Gühne and G. Tóth:  
Entanglement detection,  
Phys. Rep. 474, 1 (2009); arxiv:0811.2803.
- [34] M. Koniorczyk and G. Tóth:  
Quantum entanglement: An introduction, book chapter in Hungarian in New results of quantum  
optics and quantum electronics, Ed. K. Osvey, Eötvös Physical Society, 2006.
- [35] G. Tóth:  
QUBIT4MATLAB V3.0: A program package for quantum information science and quantum optics  
for MATLAB,  
Comput. Phys. Comm. 179, 430 (2008); arxiv:0709.0948.
- [36] G. Tóth and O. Gühne:  
Separability criteria and entanglement witnesses for symmetric quantum states,  
Appl. Phys. B, in press ; arxiv:0908.3679.
- [37] G. Tóth and O. Gühne:  
Entanglement and permutational symmetry,  
Phys. Rev. Lett. 102, 170503 (2009); arxiv:0812.4453.
- [38] O. Gühne, M. Mechler, G. Tóth, and P. Adam:  
Entanglement criteria based on local uncertainty relations are strictly stronger than the computable  
cross norm criterion,  
Phys. Rev. A 74, 010301(R) (2006).
- [39] A Vukics, J Janszky and P Domokos:  
Cavity cooling of atoms: a quantum statistical,  
J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 38, 1453-1470 (2005).
- [40] A. Vukics and P. Domokos:  
Simultaneous cooling and trapping of atoms by a single cavity-field mode,  
Phys. Rev. A 72, 031401 (2005).
- [41] J. K. Asbóth, P. Domokos, H. Ritsch, and A. Vukics:  
Self-organization of atoms in a cavity field: Threshold, bistability, and scaling laws,  
Phys. Rev. A 72, 053417 (2005).

- [42] D. Nagy, J. K. Asboth, P. Domokos, H. Ritsch:  
Self-organization of a laser-driven cold gas in a ring cavity,  
Europhysics Letters, 74, 254-260 (2006)
- [43] Domokos P.:  
A fény mechanikai hatása optikai rezonátorban,  
in: A kvantummechanika és kvantumelektronika új eredményei, szerk. Osvay K., (2006).
- [44] A. Vukics, H. Ritsch:  
C++QED: An object-oriented framework for wave-function simulations of cavity QED systems,  
European Physical Journal D 44, 585 (2007).
- [45] J. K. Asbóth, P. Domokos:  
Comment on "Coupled dynamics of atoms and radiation-pressure-driven interferometers" and "Superstrong coupling regime of cavity quantum electrodynamics",  
Phys. Rev. A 76, 057801 (2007).
- [46] J. K. Asbóth, H. Ritsch H, P. Domokos:  
Collective excitations and instability of an optical lattice due to unbalanced pumping,  
Phys. Rev. Lett. 98, 203008 (2007).
- [47] G. Szirmai and P. Domokos:  
Geometric Resonance Cooling of Polarizable Particles in an Optical Waveguide,  
Phys. Rev. Lett. 99, 213602 (2007).
- [48] C. Maschler, H. Ritsch, A. Vukics, P. Domokos:  
Entanglement assisted fast reordering of atoms in an optical lattice within a cavity at  $T = 0$ ,  
Opt. Communication 273, 446-450 (2007).
- [49] D. Nagy, P. Domokos:  
Dipole-dipole instability of atom clouds in a far-detuned optical dipole trap,  
Phys. Rev. A 75, 053416 (2007).
- [50] D. Nagy, G. Szirmai, P. Domokos:  
Self-organization of a Bose-Einstein condensate in an optical cavity,  
Eur. Phys. J. D 48, 127-137 (2008).
- [51] J. K. Asbóth, H. Ritsch, P. Domokos:  
Optomechanical coupling in a one-dimensional optical lattice,  
Phys. Rev. A 77, 063424 (2008).
- [52] G. Szirmai, D. Nagy, and P. Domokos:  
Excess Noise Depletion of a Bose-Einstein Condensate in an Optical Cavity,  
Phys. Rev. Lett. 102, 080401 (2009)
- [53] A. Karpati, P. Adam, Z. Kis and J. Janszky:  
Stochastic unraveling of the time-evolution operator of open quantum systems,  
Europhys. Lett., 75, 209-215, (2006).