

4. félévi beszámoló

**Curko Árpád** (curko.arpad@wigner.mta.hu)

Statisztikus Fizika, Biológiai Fizika és Kvantumrendszerek Fizikája PhD program

Témavezető: Vukics András

A dolgozat címe: Kvantumos fény-anyag kölcsönhatás

## 1. Bevezetés

Tudományos kutatásom fókuszában az atom és elektromágneses sugárzás kölcsönhatásának vizsgálata áll, ami a kvantummechanikának egy olyan szegmensét próbálja feltérképezni, mely a mai napig dinamikus fejlődést mutat. Hozzájárul a kvantummechanika törvényszerűségeinek engedelmessé váló folyamatok egyre pontosabb megértéséhez, és nem utolsósorban központi szerepet tölt be a kvantumtechnológia előrehaladásában, a klasszikus számítógépektől eltérő gépek felépítésére kifejlesztett módszerek, technikák megalkotásában.

Az eddigi négy féléves kutatómunkám alapját a kvantuminformációban és kommunikációban jelenleg is alapproblémának számító, olyan folyamatok kidolgozása, kielemezése képezte, melyek optikai fotonok keltését teszi lehetővé jól meghatározott tér- és időbeli módusba. Az így keltett fotonok olyan qubitekként szolgálhatnak, melyek lehetővé teszik az információ kvantumos tárolását és hosszú távolságon belüli szállítását kvantumcsatornákon (szabad tér vagy optikai szál) keresztül [1], [2]. Az atomi rendszerek hatékonyan tudnak csatolódni az optikai fotonokhoz és a mikrohullámú térhez is, mely utóbbi lehetővé teszi a kvantumszámítógépeknél alapvető fontosságú szupravezető áramkörökhöz való kapcsolódást [3], [4]. Tehát a mikrohullámú-optikai konverzió lényegi jelentőséggel bíró folyamat a kvantumtechnológiában. Az alkáli atomok alkalmasnak ígérkeznek ezen probléma kivitelezésében, megoldásában, hiszen rezonanciákkal rendelkeznek úgy az optikai, mint a mikrohullámú tartományban, az elektromos dipól és hiperfinom átmenetek révén.

## 2. Az előző három félévben elért kutatási eredmények összegzése

### 2.1. Hideg atomok rendszere

Hideg, csapdázott atomoknál vizsgáltuk a fent említett fotonkonverziót, keresve a folyamat során keltett foton optimális begyűjtésének feltételeit. Háromszintes  $\{|g\rangle, |s\rangle, |e\rangle\}$ ,  $\Lambda$  sémájú atomokból felépülő rendszert elemeztünk, ahol mikrohullámú folyamat által létrehozott egyetlen gerjesztett  $|s\rangle$  atomból, meghajtó lézerpulzus közbeiktatásával valósul meg az  $|e\rangle - |g\rangle$  átmenethez tartozó optikai egyfotonkeltés. Az ily módon létrehozott elektromágneses sugárzást pedig Gauss-optika gyűjti össze az optikai szálba. A konverziót domináló, a meghajtó tér iránya által definiált előreszórást vizsgáltuk hengerszimmetrikus Gauss sűrűségeloszlású<sup>1</sup> atomi rendszeren. Az optimalizáció során arra jutottunk, hogy a kiolvasó tér hullámhosszánál nem nagyobb karakterisztikus mérettel<sup>2</sup> rendelkező atomi felhőre, a leképező paraxiális optikát jellemző nyalábnyak ideális értéke, mely maximalizálja a becsatolt fotonrátát, megegyezik a meghajtó tér irányára merőleges méretével

<sup>1</sup>tipikusan a harmonikus csapdában lévő atomokra jellemző sűrűségeloszlás

<sup>2</sup>az atomok Gauss-eloszlását jellemző  $\sigma$  és  $\sigma_z$  szórások

a hidegatom felhőnek. Ahogyan a csapda mérete a hullámhossz tartományába esik, az optimális nyalábnyak már az atomi rendszer transzverz méretének többszöröse lesz, ami azzal magyarázható, hogy a kis méretű felhővel való maximális átfedéshez erősen fókuszált Gauss-nyalábra van szükségünk, ami nagy nyalábnyakat jelent. Továbbá az is megfigyelhető, hogy az egyre kompaktabb, rövidebb és keskenyebb hidegatom felhő (ennek a geometriának megfelelő egyre növekvő nyalábnyakkal) egyre nagyobb becsatolási fotonrátát eredményez. Viszont ennek az optimalizációnak a modell érvényességi tartománya szabható, hiszen az egyre kisebb hidegatom felhő, egyre nagyobb sűrűséget eredményez, ami az atom-atom kölcsönhatások és a többszörös szórások figyelembevételét követeli meg, és ezen folyamatokat a jelen modellünk nem foglalja magába.

## 2.2. Ultrahideg atomok rendszere

Kutatásom ezen szakaszában áttértünk az ultrahideg atomok rendszerére, melyet mint Bose-Einstein-kondenzátumot (BEK) tekintettünk. A hideg atomok tárgyalásától eltérően, itt figyelembe vettük annak a lehetőségét, hogy a kondenzátum képes impulzust felvenni a meghajtó tértől, ezzel a keltett egyfoton állapotát is befolyásolva. Ezen megközelítéssel a belső elektronállapotokat jellemző  $\{|g\rangle, |s\rangle, |e\rangle\}$  bázist kiterjesztettük a külső mozgásállapotokat meghatározó kvantumszámokkal, melyekhez a harmonikus oszcillátor csapdaállapotait valamint a kvázi-szabad, közel impulzus sajátállapotokat társítottuk. A BEK végállapota szerint pedig két, jól elhatárolható esetet különítettünk el, annak függvényében hogy a fotonkonverziót követően az ultrahideg atomok rendszere visszatér-e a kiindulási,  $\phi_{\text{BEK}}$  kondenzátum alapállapotba vagy sem. Ha nem tér vissza a  $\phi_{\text{BEK}}$ -be, akkor a kijövő fotonintenzitás  $N$ -nel lesz arányos, ahol  $N$  az atomok számát jelöli, ellenkező esetben viszont a szuperradiancia jelensége lép fel, a bozonikus erősítésnek köszönhetően már  $N^2$ -tel lesz arányos a becsatolt fotonráta. Számolásinkban minden egyes esetben csak az impluzusmegmaradó átmeneteket vettük figyelembe, ezzel azonban olyan járulékoktól tekintettünk el, melyek hozzájárulnak a keltett sugárzás izotróp részének a felépítéséhez. Az ehhez szükséges módosított tárgyalást, elemzést az aktuális, 4. félévben végeztük el.

## 3. Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése

### 3.1. Ultrahideg atomok rendszere

A BEK által megvalósított fotonkonverzió legújabb tárgyalásában a külső mozgásállapotokat  $\phi_{\mathbf{k}}$  impulzus sajátállapotokként kezeltük, továbbá feltettük azt, hogy a  $\phi_{\text{BEC}}$  kondenzált hullámfüggvény, mely magába foglalja az atom-atom kölcsönhatásokat is, széles átfedést mutat a  $\phi_0$  nulla impulzusú állapottal. Ezek felhasználásával újból kivizsgáltuk a keltett sugárzás mindkét komponensét.

- A végállapot a  $\phi_{\mathbf{k}\neq 0}$  momentumállapot, mely befoglalja azon eseteket, melyek során az ultrahideg atomok rendszere impulzust visz el a besugárzó terektől. Ezek teljes járulékát megkaptuk az összes lehetséges  $\mathbf{k} \neq 0$ -ra vett felösszegzéssel, függetlenül attól, hogy az egyes részfolyamatok teljesítik az impulzus megmaradását vagy sem. Ezzel a fotonkonverzió során keltett sugárzásnak az  $N$ -nel arányos, izotróp összetevőjét kapjuk vissza.
- A végállapot a  $\phi_{\text{BEC}}$  kondenzátum alapállapot, mely a már említett  $N^2$ -es és egy nem triviális  $\theta$  szögfüggést mutat, ahol  $\theta$  a meghajtó tér és a begyűjtő optikai szál

által bezárt szög. Ha a longitudinális csapdaméret összemérhető a Gauss-nyalábhoz rendelt Rayleigh-hosszal, akkor szuperradiáns sugárzás maximumát nem a  $\theta = 0$ -nál kapjuk, ami azzal magyarázható, hogy ilyen esetekben a Gauss-módusban megjelenő görbületi tag és Gouy-fázis jelentőssé válik, és ezen fázistagok ellensúlyozására a nem előreszórásból származó fázistagra van szükség.

Összehasonlítva ezen két járulékot arra a következtetésre jutottunk, hogy a nullához közeli szögtartományban a szuperradiáns rész dominál az izotróppal szemben. A kondenzátumban lévő atomok számának növekedésével azonban a széles tartomány, melyen a konstans háttértag a meghatározó, egyre keskenyebb lesz. Tehát azzal, hogy lehetővé tettük a kondenzátum számára, hogy impulzust vegyen át a folyamat során, egy olyan komponensét kaptuk meg a kibocsájtott sugárzásnak, mely a korábban tárgyalt hideg atomok esetében nem jelent meg.

### 3.2. Fotonblokádjelenségének letörése fázisátalakulás formájában

A félév során sikerült a Kvantumoptika Csoport egy kísérleti megfigyelését részben leíró elméleti modell kidolgozásában részt vennem. Üregrezonátorban lévő atomok jelenlétében történő fotonblokádjelenséget figyelték meg, a sokatomos ( $N > 10^4$ ) erősítésnek köszönhetően az üregrezonátor módusához való kollektív csatolás nagy. Megfelelő elhangolások és pumpa lézer intenzitás mellett a folyamat két, jól elkülöníthető tartományra bontható. A sötét fázisban az atomok megakadályozzák, hogy a lézer fény áthaladjon az üregrezonátoron. A rezonátor térben lévő fluktuációk megnövekedésével, ami a termális fotonok számának megugrásával érhető tetten, azonban az atomok az üregrezonátorhoz nem csatolt állapotba kerülnek át, ezzel lehetővé téve a lézer transzmisszióját a rezonátoron keresztül. Egy egyszerű szemiklasszikus modell keretében próbáltuk meg visszakapni az előbb említett fázisátalakulás egyes részleteit. Az általános atom-rezonátor kölcsönhatást kiegészítettük egy  $\Gamma$  rátával jellemzett bomlási taggal, amely olyan sötét állapotba viszi át az atomot, ami már nem csatolódik az üregrezonátor módusához. Átlagtér közelítést használva, a Heisenberg-Langevin mozgásegyenleteken keresztül sikerült visszanyernünk a kísérletben megfigyelt fázisátalakulást. Ezen elméleti leírással a termikus fotonok nem követhetőek nyomon, itt, a valós folyamattal ellentétben, az átmenet bekövetkezésének idejét a numerikus fluktuációk határozzák meg. A kísérletben mért adatok felhasználásával megkaptuk az egyetlen illesztési paramétert, a  $\Gamma$ -t, ezt ismerve, az átmenethez tartozó görbe meredeksége több különböző lézer intenzitásra is jól illeszkedik a kísérletben mért értékekkel. Az ebből született cikk az elkövetkezendő napokban kerül beküldésre, melyhez, mint társszerző, az elméleti rész megalkotásában járultam hozzá.

## 4. Publikációk

- Elsőszerzős cikkem: A. Kurkó, P. Domokos, A. Vukics, T. Bækkegaard, N.T. Zinner, J. Fortágh, D. Petrosyan, *Optimal collection of radiation emitted by a trapped atomic ensemble*, EPJ Quantum Technol. (2021) **8**: 11
- Napokon belül beküldésre kerül: T. W. Clark, A. Dombi, F. I. B. Williams, A. Kurkó, J. Fortágh, D. Nagy, A. Vukics, P. Domokos, *Time-resolved observation of a dynamical phase transition of atoms in a cavity*

- A cikk megírás folyamatának a végéhez közeledünk, heteken belül beküldésre kerül:  
*Coupling of a single photon emitted from a Bose-Einstein condensate into a single-mode fiber*

## 5. Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben

A negyedik félévben az alábbi kurzuson vettem részt:

- FIZ/3/066E Nyitott kvantumrendszerek elméletei

## 6. Konferenciák a képzés alatt

2019. szeptember 3-6-án részt vettem a Barcelonában megrendezésre került AtomQT nyári iskolán, ahol poszter-prezentációt tartottam a *Self-organization of a Bose-Einstein condensate in an optical cavity and the Dicke-model* címmel. Továbbá elfogadták a 2020 márciusában megrendezésre kerülő IFF Quantum Technology tavaszi iskolára a jelentkezésemet, azonban a járványhelyzet miatt ez felfüggesztésre került.

## Hivatkozások

- [1] H. J. Kimble, *The quantum internet*, Nature **453**, 1023 (2008).
- [2] J. L. O'Brien, A. Furusawa, J. Vuckovic, *Photonic quantum technologies*, Nature Photon. **3**, 687 (2009).
- [3] G. Kurizki, P. Bertet, Y. Kubo, K. Mølmer, D. Petrosyan, P. Rabl, J. Schmiedmayer, *Quantum technologies with hybrid systems*, PNAS **112**, 3866 (2015).
- [4] D. Petrosyan, K. Mølmer, J. Fortágh, M. Saffman, *Microwave to optical conversion with atoms on a superconducting chip*, New J. Phys. **21**, 073033 (2019)