

3. 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

Kutatásunk alapját a korábbi két félévhez hasonlóan továbbra is a csapdázott atomi rendszerek által megvalósított fotonkonverzió képezi.

A modell egyszerűsítése érdekében azonban a háromszintes lambda rendszerre térünk át. Ahol a mikrohullámú jel beírásával az N darab $|g\rangle$ alapállapotban lévő atom egyikét az $|s\rangle$ állapotba gerjesztjük fel. Ezt követően az $\Omega_d(t)$ Rabi-frekvenciával és k_d hullám-számmal jellemzett koherens térrel megvilágítva létrehozunk az $|e\rangle$ közbenső állapotba való átmenetet. Ahonnan a spontán emisszió révén az atom visszaesik a $|g\rangle$ alapállapotba. Az így keletkezett fotont Gauss-optikával képezzük le az optikai szálba. A számolásaink célja, hogy kielemezzük, milyen hasonlóságok és eltérések adódnak, ha a csapdázott atomi rendszert, mint hideg atomok együttesét vagy pedig, mint Bose-Einstein-kondenzátumot (BEC) tekintjük.

2. Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése

A hideg atomok rendszerét oly módon kezeltük, hogy a fotonkonverzió során az atomfelhő mozgásállapota nem változik, nem vesz át impulzust a meghajtó tértől, és ezzel együtt az atomok térbeli eloszlását leíró sűrűségfüggvény sem szenved változást. Ezzel szemben a kondenzátumnál figyelembe vettük a mozgásállapot megváltozásának lehetőségét. Ami nem jelent mást az elméleti leírásban, mint hogy plusz szabadsági fokokat rendeltünk a $|e\rangle \equiv |j\rangle$ közbenső- és $|g\rangle \equiv |f\rangle$ végállapothoz. Ahol a j és f kvantumszámokhoz a harmónikus oszcillátor csapdaállapotait valamint a kvázi-szabad, közel impulzus sajátállapotokat társítottuk. Ha egy jól meghatározott $|j\rangle$ és $|f\rangle$ állapotok választódnak ki, akkor az ezekhez rendelt, az optikai szálba becsatolt I_{fj} foton ráta a következőképpen írható:

$$I_{fj} \sim h(N) |\epsilon_{Nj}(t)|^2 \left| \int dV f_{\mathbf{k}}^*(\mathbf{r}) \Phi_j(\mathbf{r}) \Phi_f^*(\mathbf{r}) \right|^2 \equiv h(N) |\epsilon_{Nj}(t)|^2 |\chi|^2. \quad (1)$$

A fenti összefüggésben, ami a számolásaink kiindulópontját képezi, a $h(N)$ függvény a BEC-ben lévő N fotonszámmal egyenlő, ha a legerjesztődés során az atom visszatér a csapda Φ_0 alapállapotba, ahol a többi $N - 1$ atom tartózkodik. Így a bozonikus erősítésnek köszönhetően a fotonrátaban megjelenik egy plusz N faktor, ami, és itt lényeges kihangsúlyozni, a hideg atomok esetében nem jön be. Azonban ha az atom nem az alapállapotba tér vissza, akkor az erősítés nem jelenik meg, a $h(N)$ az 1 értéket veszi fel. A becsatolás erősségét a χ geometriai faktor is meghatározza, amit a Gauss-optikához rendelt $f_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ módusfüggvény valamint a kondenzátumot jellemző $\Phi_j(\mathbf{r})$ és $\Phi_f(\mathbf{r})$ közbenső- és végállapothoz rendelt hullámfüggvények atfedése adja. A $|j\rangle$ állapothoz tartozó ϵ_{Nj} amplitúdó értékét pedig a $\zeta = \int dV e^{i\mathbf{k}_d \cdot \mathbf{r}} \Phi_0(\mathbf{r}) \Phi_f^*(\mathbf{r})$ átfedési integrál valamint a belső dinamikát leíró mozgásegyenletekből kiszámítható N függés adja. Tehát összességében a becsatolás hatékonyságát a χ és ζ geometriai faktorok valamint a kondenzátumban lévő atomok száma határozza meg.

A féléves kutatásunkban három esetet különítettünk el:

- Nem közlünk elég energiát a meghajtó téren keresztül a BEC-cel, a $|g\rangle \rightarrow |e\rangle$ felgerjesztés megvalósul, ellenben a kondenzátum mindvégig a Φ_0 alapállapotban marad. Ezen esetben a geometriai faktorok akkor lesznek nem elhanyagolhatóan kicsik, ha a csapda méretei kisebbek, mint a meghajtó tér λ_d hullámhossza: $\sigma, \sigma_z \ll \lambda_d$. Ez az effektus a geometriai faktorokból el nem tűnő $e^{i\mathbf{k}_d\mathbf{r}}$ és $e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}}$ fázis tagokból származik. Tehát az erősen csapdázott esetben a közel pontszerű kondenzátum az ideális. Ahhoz, hogy a hullámhossznál kisebb csapdaméret feltétele teljesüljön a BEC-et optikai rácson kell csapdázni. A jövőbeni kutatásunkat ebbe az irányba is szeretnénk folytatni.
- Ha elég energiát közlünk vagyis a $|g\rangle \rightarrow |e\rangle$ gerjesztést követően a maradék $\Delta\omega = \omega_d - \omega_{eg}$ frekvencia jóval nagyobb, mint a csapdafrekvencia, akkor a kondenzátum kvázi-szabad lesz, impulzust képes felvenni. Az ehhez rendelt hullámfüggvénynek a $\Phi_{\mathbf{p}}(\mathbf{r}) = \Phi_0 e^{i\mathbf{p}/\hbar\mathbf{r}-t}$ választottuk, ahol a \mathbf{p} a BEC által felvett impulzus. Ha a közbenső- és végállapothoz rendelt impulzusokat a következőképpen választjuk meg: $\mathbf{p}_j/\hbar = \mathbf{k}_d$ és $\mathbf{p}_f/\hbar = \mathbf{k}_d - \mathbf{k}$, akkor a geometriai faktorok nem lesznek elnyomva az oszcilláló fázis tagok révén. Tulajdonképpen ez ekvivalens az impulzusmegmaradással, tehát momentumörző átmenetek felerősítik a χ és ζ geometriai faktorokat, ezzel növelve a becsatolt fotonintenzitást. Ugyanakkor, ha a megmaradási törvény kielégítésével nyerünk is, a bozonikus erősítés nem biztos, hogy megjelenik, csak abban az esetben, ha az atom visszatér az alapállapotba. Ekkor viszont a \mathbf{p}_f -nek nullának kell lenni, ami csak az előreszórásakor biztosított: $\mathbf{k}_d = \mathbf{p}_j/\hbar = \mathbf{k}$. Ezzel azonban az a probléma lép fel, hogy a kísérleti megvalósításban nehezen detektálható a meghajtó tér irányával azonos irányban kilépő, a konverzió során keltett foton. A csapdázott hideg atomokkal összehasonlítva, a geometriai faktorok felerősítése csak akkor volt megvalósítható, ha a minden egyes atomhoz hozzárendelünk egy plusz fázist, a kondenzátum esetében viszont a szabad állapotok behozatala és az impulzusmegmaradás maga után vonja a geometriai faktorokban megjelenő síkhullám tagok kompenzálását.
- Tetszőleges közbenső, közel impulzus sajátállapotot megengedünk, viszont a legerjesztődés során az atom mindig a csapda alapállapotába tér vissza, így ezzel a bozonikus erősítést visszacapjuk. Azonban a momentummegmaradás csak az előreszórásnál biztosított, így ha a bemenő és a kijövő foton iránya által közrezárt szöveget növeljük, akkor a geometriai faktorok csökkenése miatt a fotonráta is egyre kisebb lesz.

3. Publikációk

Kutatási eredményeinket két cikkre bontva szeretnénk publikálni. Az elsőnek a megírása, amely a hideg atomok keretében tárgyalt fotonkonverzióra fókuszál megtörtént, és beküldtük az European Physical Journal folyóirathoz, de még várunk az elbírálására:

A. Curko, P. Domokos, A. Vukics, T. Bækkegaard, N.T. Zinner, J. Fortágh, D. Petrosyan: *Optimal collection of radiation emitted by a trapped atomic ensemble* (<https://arxiv.org/abs/2011.07094>).

A második cikk megírása folyamatban van, ami a Bose-Einstein-kondenzátumos egy-fotonkeltést taglalja.

4. Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben

Az harmadik félévben az alábbi kurzusokon vettem részt:

- FIZ/3/060E Kvantuminformáció-elmélet
- FIZ/3/044E Új kísérletek a kvantummechanikában