

Нэг атомт микромазер дахь орны фотоны статистик

Б. Тоголдор¹, Г. Ариунболд²

¹Монгол улсын их сургууль, ФЭС

²Institute for Quantum Optics,

Department of Physics

Texas A&M University College Station,

TX 77843-4242, USA

Нэг атомт микромазер дахь орны фотоны статистикийн судалгааг Жейнс-Каммингсын загварын дагуу хийлээ. Ингэж судлахдаа кавити дахь орны хугацааны хувьсалын тэгшитгэлийг матрицан хэлбэрт оруулж тоон аргаар бодлоо. Орны хугацааны сааталгүй Глауберийн функц ба Манделийн Q параметр хоёрыг хооронд нь харьцуулан судлаж тодорхой үр дүнд хүрлээ. Мөн Жейнс-Каммингсын загвараас гарах сэргэлт мохолтийн үзэгдлийг давтан үзүүлээ.

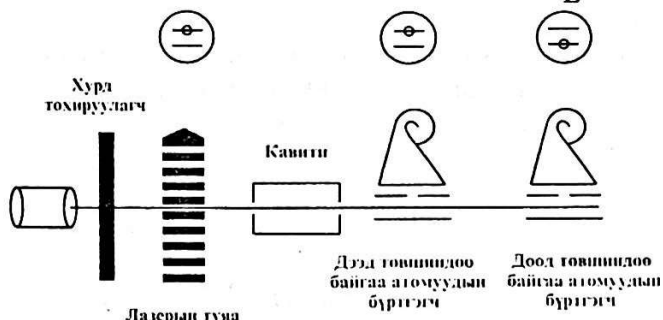
PACS number: 42.50.Pq

ОРШИЛ

Хоёр түвшинт атом, нэг давтамжтай орон хоёрын харилцан үйлчлэлийг судлах нь квант онолын чухал зорилт юм. Энэ системийг анх онолын хувьд Жеймс, Каммингс судалсан [1]. Хожим нэг атомт мазер буюу микромазерыг зохион бүтээсэн [2,3] явдал бол энэ системийг туршлагаар судлах боломжийг олгосон байна. Нэг атомт мазерт өндөр Q фактортой кавити дотор өдөөгдсөн төлөвтөө байгаа Ридбергийн атомуудыг нэг нэгээр нь оруулж түүний кавитийн нэг моодтой оронтой харилцан үйлчлэлцэх процессыг судалдаг. Кавитигийн чанарын Q фактор гэдэг нь кавитийн орны унтралын хугацаанд орон хэдэн хэлбэлзлийн цикл хийж байгааг илэрхийлдэг ө.х.

ойролцоогоор

$$\frac{\nu}{L} = Q.$$



Зураг 1. Нэг атомт мазерын туршилтын схем (M.O.Scully and M.S.Zubairy Quantum Optics номноос)

Жишээлбэл Garching-д хийгдсэн микромазерын туршилтын [4] хувьд $\nu = 21.5 \text{ GHz}$, $L = 1.43 \text{ Hz}$ гэж тооцвол Q нь $1.5 \cdot 10^{10}$ гэсэн утганд хүрч байна. Зураг (1)-д Макс Планкийн нэрэмжит квант оптикийн институтэд (Germany, Garching) хийгдсэн нэг атомт мазерын туршилтын ерөнхий схемийг үзүүлэв. Багц Рубидийн атомын цацраг Физогын хурдны

шилэгчээр нэвтэрч нэгэн ижил хурдтай болно. Кавити руу орохын өмнө атомуудыг $63P_{3/2}$ гэсэн мазерын төвшинд лазерын туяаны тусламжтайгаар өдөөно. Хэт дамжуулагч Ниобийн кавитиг $0.5K$ хүртэл хөргөх ба энэ температурт дундаж дулааны фотоны тоо 0.15 хүртэл багасна.

Кавитигийн Q факторыг 10^{10} эрэмбэтэй болгож чадсан нь түүн доторх орны унтралын хугацааг атом орны харилцан үйлчлэх хугацаанаас олон дахин их болгосон. Ийм тохиолдолд харилцан үйлчлэлийн үед орны унтралыг тооцохгүй байж болно. Мөн Рубидийн атомын хоёр төвшний амьдрах хугацаа нь кавити доторх орон атомын харилцан үйлчлэлийн хугацаанаас олон дахин их гэж үзье. Ийм замаар атомын аяндаа цацаргах үзэгдлийг тооцохгүй байж болно. Кавити дундуур нэвтрэн өнгөрсөн атомуудыг орны иончлолын бүртгэгчээр бүртгэж атом аль төвшиндөө байгааг хэмжинэ. Нэг атомт мазерын туршилтанд гэрлийн орны субпуассоны статистик, бөөгнөрөл ба сийрэгжилт, орны ханасан төлөв зэрэг олон классик бус үзэгдлүүд [5,6] ажиглагддаг.

I. КАВИТИ ДАХЬ ГЭРЛИЙН ОРОН, АТОМЫН ХАРИЛЦАН ҮЙЛЧЛЭЛ

Өндөр Q фактортой кавитигийн нэг моодтой нэг атом харилцан үйлчлэлцэх моделийг авч үзье. Хугацааны эгшин бүрд кавити дотор нэгээс ихгүй атом байхаар өдөөгдсөн атомуудын хурдыг бага гээ. Жейнс-Каммингсын загвар ёсоор хоёр төвшинт нэг атом нэг моодтой гэрлийн орон хоёрын харилцан үйлчлэл дараах мастер тэгшитгэлээр илэрхийлэгдэнэ.

$$\begin{aligned} \rho_f(t) = & \left(C_n \rho_f C_n + \frac{S_{n-1}}{\sqrt{\hat{n}}} a^+ \rho_f a \frac{S_{n-1}}{\sqrt{\hat{n}}} \right) \rho_{aa} + \\ & + \left(C_{n-1} \rho_f C_{n-1} + \frac{S_n}{\sqrt{\hat{n}+1}} a \rho_f a^+ \frac{S_n}{\sqrt{\hat{n}+1}} \right) \rho_{bb} + \\ & + i \left(C_{n-1} \rho_f a \frac{S_{n-1}}{\sqrt{\hat{n}}} - \frac{S_n}{\sqrt{\hat{n}+1}} a \rho_f C_n \right) \rho_{ba} + \\ & + i \left(C_n \rho_f a^+ \frac{S_n}{\sqrt{\hat{n}+1}} - \frac{S_{n-1}}{\sqrt{\hat{n}}} a^+ \rho_f C_{n-1} \right) \rho_{ab} \end{aligned}$$

Энд $C_n = \cos(gt\sqrt{\hat{n}+1})$, $S_n = \sin(gt\sqrt{\hat{n}+1})$ болно. Өдөөгдсөн атом кавити дотор $t=0$ хугацаанд ороод τ хугацаанд нэг моодтой оронтой харилцан үйлчлэлцээд гарсан бол орны нягтын оператор

$$\rho_f(\tau) = \left(C_n \rho_f C_n + \frac{S_{n-1}}{\sqrt{\hat{n}}} a^+ \rho_f a \frac{S_{n-1}}{\sqrt{\hat{n}}} \right) \rho_{aa} \quad (1)$$

бөгөөд τ хугацааны дараа орон n фотонтой төлөвт байх магадлал

$$P_r(n) = \cos^2(gt\sqrt{n+1})P_0(n) + \sin^2(gt\sqrt{n})P_0(n-1) \quad (2)$$

Үүнийг матрицан хэлбэрт оруулж бичвэл

$$R(\tau) = MR(0), \quad (3)$$

энд

$$R(\tau) = \begin{pmatrix} P_r(0) \\ P_r(1) \\ \vdots \\ P_r(n) \\ \vdots \end{pmatrix}$$

M нь

$$\begin{aligned} M_{l,l} &= \cos^2(gt\sqrt{l}), \\ M_{l,l-1} &= \sin^2(gt\sqrt{l-1}) \end{aligned}$$

элементтэй матриц.

II. КАВИТИ ДАХЬ ОРНЫ УНТРАЛ

Одоо кавитигийн унтралыг авч үзье. Унтралын квант онол ёсоор дулааны резервуартай харилцан үйлчлэлцэх орны унтралын тэгшитгэл дараахь байдлаар бичигдэнэ.

$$\begin{aligned} \dot{\rho} = & -\frac{\zeta}{2} \bar{n}_{th} (a a^+ \rho - 2 a^+ \rho a + \rho a a^+) - \\ & -\frac{\zeta}{2} (\bar{n}_{th} + 1) (a^+ a \rho - 2 a \rho a^+ + \rho a^+ a) \end{aligned} \quad (4)$$

Энэ тэгшитгэлийг нягтын операторын диагоналиудын элементүүдийн хувьд бичвэл

$$\begin{aligned} \dot{P}(n) = & -\zeta(\bar{n}_{th}(2n+1)+n)P(n)+ \\ & + \zeta \cdot \bar{n}_{th} n P(n-1)+ \\ & + \zeta(\bar{n}_{th}+1)(n+1)P(n+1). \end{aligned} \quad (5)$$

болно. Энэ тэгшитгэлийг өмнөхтэй мөн адил матриц хэлбэрт оруулж бичээд бодож болно.

$$\dot{K}(t) = NK(t) \quad (6)$$

Энд

$$K(t) = \begin{pmatrix} P_r(0) \\ P_r(1) \\ \vdots \\ P_r(n) \\ \vdots \end{pmatrix}$$

ба N нь

$$\begin{aligned} N_{k,k} &= -\zeta(\bar{n}_{th}(2k-1)-k-1), \\ N_{k,k-1} &= \zeta \cdot \bar{n}_{th}(k-1), \\ N_{k,k+1} &= \zeta(\bar{n}_{th}-1)k. \end{aligned}$$

элементтэй матриц болно. Энэ матрицан тэгшитгэлийн шийд нь

$$K(t) = \exp(N \cdot t)K(0) \quad (7)$$

гэж илэрхийлэгдэнэ.

III. КАВИТИ ДАХЬ ОРНЫ ХУГАЦААНЫ ХУВЬСАЛЫГ ТООН АРГААР БОДОХ НЬ

Кавити дотор орон атомтой харилцан үйлчлэлцэхээс гадна түүнтэй нэгэн зэрэг кавитигийн дулааны болон вакуум флукуацитай харилцан үйлчлэлцэнэ. Зэрэг явагдаж байгаа энэ хоёр харилцан үйлчлэлийг атом орны харилцан үйлчлэх хугацаа орны унтралын хугацаанаас олон дахин бага гэж ойролцоолон дараахь схемн дагуу тоон аргаар бодъё. Өөрөөр хэлбэл атом орны харилцан үйлчлэлийн үед унтралыг тооцохгүй гэсэн үг.

$$\begin{aligned} R_1(\tau_{int}) &\in MR(0), \\ R_2(\tau_{rel}) &\in \exp(N\tau_{rel})R_1(\tau_{int}), \\ R_1(2\tau_{int}) &\in MR_2(\tau_{rel}), \\ R_2(2\tau_{rel}) &\in \exp(N\tau_{rel})R_1(2\tau_{int}), \\ &\vdots \\ R_1((n-1)\tau_{int}) &\in MR_2(n\tau_{rel}), \\ R_2((n-1)\tau_{rel}) &\in \exp(N\tau_{rel})R_1((n-1)\tau_{int}), \\ &\vdots \end{aligned} \quad (8)$$

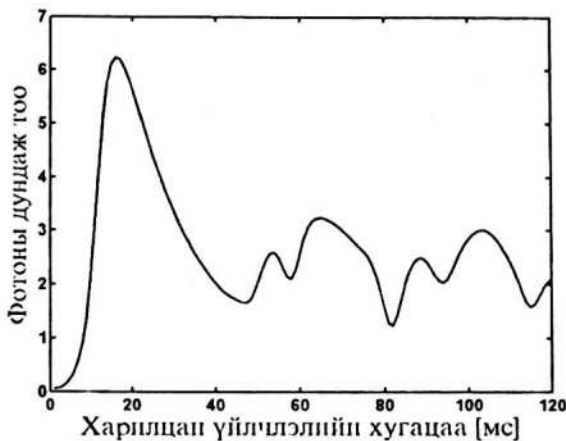
Энд τ_{int} нь атом орны харилцан үйлчлэлийн хугацаа, τ_{rel} - нэг атом кавити дундуур

нэвтрэхэд харгалзах орны унтрах хугацаа, R ийн индекс 1 нь атом орны харилцан үйлчлэлийн дараахь, индекс 2 нь унтралыг тооцсоны дараахь орны төлөвийг тус тус илэрхийлнэ.

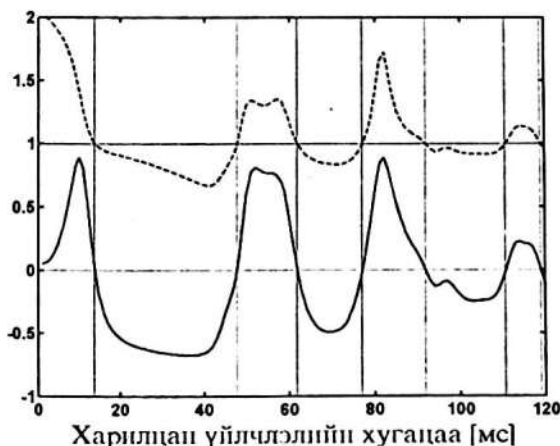
Нэг атомт мазерын хувьд дурын хугацааны эгшинд кавити дотор хамгийн ихдээ нэг атом байна. $\tau_{int} = \tau_{rel}$ гэсэн тэнцэтгэл нь хугацааны дурын эгшинд кавити дотор нэг атом байх нөхцөлд харгалзана. Мазерын онолд N_{ex} буюу орны унтралын хугацаанд кавити дундуур нэвтрэн өнгөрөх атомын тоо нь чухал хэмжигдэхүүн байдаг. $\tau_{rel} - \Gamma$ энэ хэмжигдэхүүнээр илэрхийлбэл

$$\tau_{rel} = \frac{1}{\zeta \cdot N_{ex}}$$

болно.



Зураг 2. Кавити дахь гэрлийн орны фотоны тооны дундаж харилцан үйлчлэх хугацаанаас хамаарах хамаарал. $g = 39000\text{Hz}$, $\zeta = 1.43\text{Hz}$, $N_{ex} = 7$, $\bar{n}_{th} = 0.054$.



Зураг 3. Кавити дахь гэрлийн орны Манделийн параметр Q (тасралтгүй зураас) болон хугацааны сааталгүй

Глауберийн функц (тасралттай зураас) хоёр харилцан үйлчлэлийн хугацаанаас хамаарах нь. $g = 39000\text{Hz}$, $\zeta = 1.43\text{Hz}$, $N_{ex} = 7$, $\bar{n}_{th} = 0.054$.

Зураг (2)-д кавити дахь орны фотоны тооны дундажыг харилцан үйлчлэлийн хугацаанаас хамааруулан үзүүлэв. Зургаас үзвэл харилцан үйлчлэлийн хугацаа 16 мкс байхад орны фотоны тооны дундаж хамгийн их утгандаа хүрч цаашид 40 мкс орчим үетэйгээр хэлбэлзэж байна.

Гэрлийн фотоны бүртгэлийн процессыг илэрхийлэх Глауберийн функц

$$g^2(r, \tau) = \frac{\langle a^+(0)a^+(\tau)a(\tau)a(0) \rangle}{\langle a^+(0)a(0) \rangle \langle a^+(\tau)a(\tau) \rangle} \quad (9)$$

гэж тодорхойлогддог. Микромазерын кавити доторхи гэрлийн орны Глауберийн функцийг бодож түүний классик бус төлөвийг судлая. (9) илэрхийлэлийн хүртвэрийг

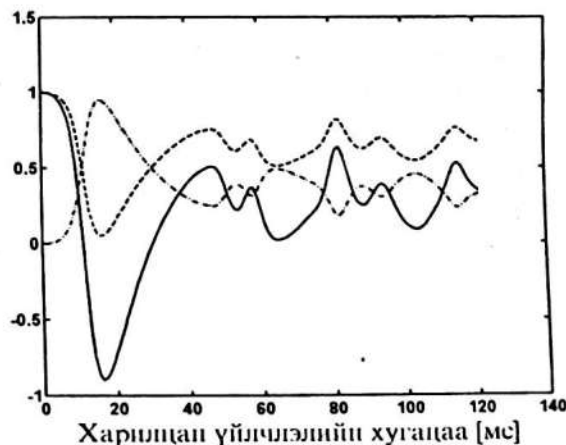
$$\langle a^+(0)a^+(0)a(0)a(0) \rangle = \text{Tr}(\rho_{n,n} |n\rangle \langle n| a^+(0)a^+(0)a(0)a(0)) = \sum_n n(n-1)\rho_{n,n} \quad (10)$$

гэж орны нягтын оператороор илэрхийлээд хугацааны сааталгүй Глауберийн функцийг бодоход илүү дөхөм хэлбэрээр бичвэл

$$g^2(r, 0) = \frac{\sum_n n(n-1)\rho_{n,n}}{\langle n \rangle^2} \quad (11)$$

болно.

Зураг (3)-аас үзвэл харилцан үйлчлэлийн хугацаа бага байх үед буюу орон вакуум төлөвтэй ойролцоо байх үед Манделийн Q параметр тэгтэй тэнцүү Пуассоны

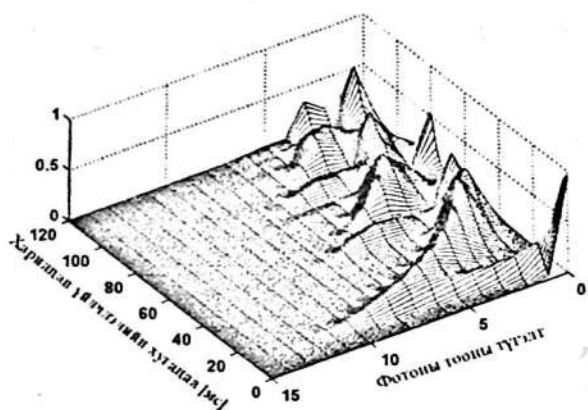


Зураг 4. Кавитигаар нэвтрэн гарч буй атомуудын дээд төвшиндөө байх магадлал (тасралттай зураас), доод төвшиндөө байх магадлал (цэгтэй тасархай зураас).

инверс (масралтгүй зураас) $g = 39000\text{Hz}$, $\zeta = 1.43\text{Hz}$.

$$N_{ex} = 7, \bar{n}_{th} = 0.054$$

статистикт захирагдаж байгаа боловч хугацааны сааталгүй Глауберийн функц нь 2-той тэнцэж фотоны бөөгнөрөл үүсгэж байна. Энэ бол их сонирхолтой чухал үр дүн юм. Харилцан үйлчлэлийн хугацаа цаашид нэмэгдэхэд субпуассоны статистик фотоны сийрэгжилт гэсэн хоёр үзэгдлүүд, суперпуассоны статистик фотоны бөөгнөрөл гэсэн үзэгдлүүд харгалзан хамт ажиглагдаж байна.



Зураг 5. Кавити дахь гэрлийн орны фотоны тооны түүгэлтийг харилцан үйлчлэлийн хугацаанаас хамааруулан дүрслэв. $g = 39000\text{Hz}$, $\zeta = 1.43\text{Hz}$, $N_{ex} = 7$, $\bar{n}_{th} = 0.054$

Зураг (4)-д кавитигаар нэвтрэн өнгөрч буй атомуудын дээд ба доод төвшиндөө байх магадлал, инверсийг харилцан үйлчлэлийн хугацаанаас хамааруулан бодов. Ингэхэд фотоны тоо хамгийн их утгандаа байх харилцан үйлчлэлийн хугацаа 16 мкс орчимд бүх нэвтрэн өнгөрөх атомууд кавити дотор цацаргалт хийж инверсийн мөхөлт үүсч байна. Харин 45 мкс орчимд инверси дахин өсч түүний сэргэлт явагдаж байна. Харин зураг (5)-аас үзвэл тодорхой тоотой $\rho(n) = 1$ гэсэн Фокын төлөв үүсэхгүй бөгөөд зөвхөн Манделийн Q параметр нь ойролцоогоор 0.6-тай тэнцэх субпуассон статистиктай төлөв ажиглагдаж байна.

ДҮГНЭЛТ

Жейнс-Каммингсын загварын үр дүн болон гарах гэрлийн оронтой харилцан үйлчлэлцэж байгаа атомуудын инверсийн мөхөлт сэргэлтийн үзэгдэл ажиглагдаж байна. Хугацааны сааталгүй Глауберийн функц ба Манделийн Q параметр хоёрыг харьцуулан судлахад атом орны харилцан үйлчлэлийн хугацаа Раби хэлбэлзэлийн нэг үетэй тэнцэх хугацаанаас олон дахин бага байх үед Пуассоны статистикт захирагдах төлөвт байгаа гэрлийн орны бөөгнөрөл гэсэн сонирхолтой үзэгдэл үүсч байна. Мөн кавити дахь гэрлийн орны фотоны тооны түүгэлтийг харилцан үйлчлэлийн хугацаанаас хамааруулан үзэхэд тодорхой тоотой Фокын төлөв үүсэхгүй байна.

НОМ ЗҮЙ

- [1] E.T. Jaynes and F.W. Cummings, Proc. IEEE 51, 89 (1963).
- [2] G.Rempe, and H.Walther, Phys. Rev. Lett. 58, 353(1987)
- [3] M.Weidinger, B.T.H.Varcoe, R.Heerlein, and H.Walther, Phys. Rev. Lett. 82, 3795(1999)
- [4] M.O.Scully and M.S.Zubairy. in Quantum Optics, Cambridge University Press 1997
- [5] W.P.Schleich, D.S.Krahmer and E.Mayr. in Quantum Optics in Phase Space
- [6] B.G.Englert, Elements of micromaser physics, 19th international Nathiagali Summer College on Physics and Contemporary Needs, Nathiagali 1994