

چلاندگی اتم-لیزر سه ترازی و فوتون های میدان در حضور محیط کر در شرایط شفافیت القایی الکترومغناطیسی

ابراهیم، قاسمیان- محمد کاظم، توسلی

یزد- صفائیه- دانشگاه یزد- دانشکده فیزیک- گروه اتمی ملکولی

چکیده: در این مقاله خروجی یک لیزر اتمی متشکل از یک آنسامبل از اتم های سه ترازی در حالت چگالیده بوز- اینشتین (BEC) که با دو میدان لیزری کوانتوسی و کلاسیکی در حضور یک محیط کر در حال برهم کنش است را مورد بررسی قرار می دهیم. در شرایط شفافیت القایی الکترومغناطیسی و با استفاده از فرآیند حذف آدیاباتیک، هامیلتونی سامانه را بر حسب عملگرهای تکانه زاویه ای بازنویسی کرده و سپس بردار حالت سامانه را با استفاده از مدل دیک به صورت تحلیلی به دست می آوریم. نتایج نشان می دهند که برهم کنش های غیرخطی مانند برخوردهای میان اتمی و محیط کر منجر به اتم ها و فوتون های چلاندیه می شوند. در این راستا، میزان چلاندگی را می توان با تنظیم قدرت برخوردهای میان اتمی، پارامتر محیط کر و دیگر پارامترهای موجود در مدل در نظر گرفته شده کنترل کرد. هم چنین، پدیده فروافت- احیا به عنوان یک مشخصه کوانتوسی محض در رفتار چلاندگی اتمی قابل مشاهده است.

کلمات کلیدی: اتم- لیزر، چگالیده بوز- اینشتین، چلاندگی اتمی و میدان، وارونی جمعیت اتمی.

Squeezing of three-level atom-laser and field photons in the presence of Kerr medium in the electromagnetically induced transparency regime

Ebrahim, Ghasemian; Mohammad Kazem, Tavassoly
Atomic and Molecular Group, Faculty of Physics, Yazd University

Abstract- In this paper we investigate the output of an atom-laser which consists of an ensemble of three-level atoms in Bose Einstein condensate (BEC) state interacting with two quantized and classical laser fields in the presence of a Kerr medium. Under electromagnetically induced transparency (EIT) regime and using the adiabatically elimination process, we represent the Hamiltonian of the system in terms of angular momentum operators and then derive its state vector explicitly with the help of the Dicke model. The results show that nonlinear interactions in the system, i.e. "interatom collisions" and "Kerr medium" lead to squeezed atoms and photons. In this respect, the squeezing values can be controlled by adjusting the strength of interatom collisions, Kerr parameter as well as other involved parameters in the considered model. Also, collapse-revival phenomenon as a pure quantum feature can be observed in the behavior of atomic squeezing.

Keywords: Atom-laser, Bose-Einstein condensate, atomic population inversion, atomic and field squeezing.

هستند. جمله‌های اول و دوم رابطه (۱)، به ترتیب هامیلتونی‌های آزاد میدان کوانتیده تکمد و اتم‌ها در ترازهای مربوطه را معرفی می‌کند. جمله سوم، برهمکنش اتم‌های سه‌ترازی با دو میدان کوانتومی و کلاسیکی را مشخص می‌کند که ω_1 و ω_2 به ترتیب بسامدهای میدان کوانتومی و کلاسیکی هستند. برخوردهای میان-اتمی در این سامانه با جملات چهارم و پنجم مشخص می‌شود که λ قدرت جفت‌شدگی اتم‌ها حین برخورد را نشان می‌دهد و جمله آخر، هامیلتونی محیط کر را با ثابت χ توصیف می‌کند. هامیلتونی سامانه را می‌توان در تصویر برهمکنش به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} H_{\text{int}} = & (\Delta_2 - \Delta_1) b_3^+ b_3 + \Delta_1 b_2^+ b_2 \\ & + \nu_1 \sum_{i=1}^3 b_i^+ b_i - (g_1 b_1^+ b_1 a + g_2 b_2^+ b_3 + H.c) \quad (2) \\ & + \sum_{i=1}^3 \lambda_i b_i^{+2} b_i^2 + \sum_{i=1}^3 \lambda_{ij} b_i^+ b_i b_j^+ b_j + \chi a^{+2} a^2, \end{aligned}$$

که $\Delta_1 = \nu_2 - \nu_1 - \omega_1$ و $\Delta_2 = \nu_2 - \nu_3 - \omega_2$ نامیزانی باریکه‌های لیزری با اتم‌ها هستند. در شرایط شفافیت القابی الکترومغناطیسی (EIT) ایده‌آل سامانه در حالت تشدید دوفوتونی است ($\Delta_2 = \Delta_1 = \Delta$). به کمک حذف بی‌دررو می‌توان هامیلتونی (۲) را در شرایط EIT به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} H_{\text{EIT}} = & 2\Omega_1 b_1^+ b_1 + \Omega_3 b_3^+ b_3 \\ & - (g_1 b_1^+ b_1 a + g_2 b_2^+ b_3 a^+ + H.c) \quad (3) \\ & + \lambda_1 b_1^{+2} b_1^2 + \Omega_1 b_1^+ b_1 a^+ a + \chi a^{+2} a^2, \end{aligned}$$

که در آن

$$\Omega_1 = -\frac{|g_1|^2}{\Delta}, \quad \Omega_3 = -\frac{|g_2|^2}{\Delta}, \quad g = -\frac{g_1 g_2}{\Delta}.$$

اکنون با استفاده از عملگرهای تکانه زاویه‌ای زیر:

$$\begin{aligned} J_+ &= b_1^+ b_3, \quad J_- = b_1 b_3^+, \quad (4) \\ J_z &= \frac{1}{2} (b_3^+ b_3 - b_1^+ b_1), \quad N = b_3^+ b_3 + b_1^+ b_1. \end{aligned}$$

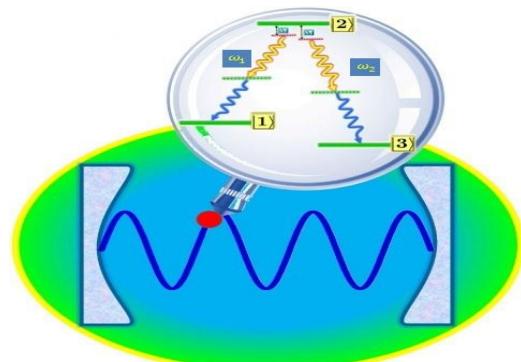
می‌توان هامیلتونی (۳) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} H_F = & \left(\frac{1}{2}\Omega_3 - \Omega_1\right) J_z - \frac{1}{2}\Omega_1 a^+ a J_z \\ & + (g J_+ a + g^* J_- a^+) \quad (5) \\ & + \frac{\lambda}{4} (J_z^2 - 2N J_z + 2J_z) + \chi a^{+2} a^2. \end{aligned}$$

مقدمه

برهمکنش نور و ماده یکی از شاخه‌های اساسی پژوهش در زمینه ماده چگال و فیزیک اتمی است. امروزه وجود لیزرهای با توان بالا منجر به دستاوردهای جدیدی شده است. در زمینه اپتیک کوانتومی برهمکنش‌های غیرخطی میان اتم‌ها و میدان‌های کوانتومی منجر به ایجاد چلاندگی در این سامانه‌ها شده است که از آنها در مخابرات نوری و آشکارسازی امواج گرانشی استفاده می‌شود. اخیراً، ویژگی‌های آماری خروجی یک سامانه متشكل از تکمد مورد بررسی قرار گرفته است [۱-۵].

مدل و حل معادلات مربوطه: یک سامانه متشكل از اتم‌های سه‌ترازی در حالت چگالیده بوز-اینشتین (BEC) که با دو میدان کوانتومی و کلاسیکی در حال برهمکنش است را در نظر می‌گیریم (شکل ۱). در این سامانه، برهمکنش اتم-میدان و برخوردهای میان‌اتمی در یک محیط کر صورت می‌گیرد. هامیلتونی سامانه مورد نظر در تقریب موج چرخان به صورت زیر است [۶]:



شکل ۱: سامانه متشكل از یک اتم سه‌ترازی که با دو میدان کوانتومی و کلاسیکی در حضور یک محیط کر برهمکنش می‌کند.

$$\begin{aligned} H = & \omega_1 a^+ a + \sum_{i=1}^3 \nu_i b_i^+ b_i \\ & - (g_1 b_1^+ b_1 a + g_2 b_2^+ b_3 e^{-i\omega_2 t} + H.c) \quad (1) \\ & + \sum_{i=1}^3 \lambda_i b_i^{+2} b_i^2 + \sum_{i=1}^3 \lambda_{ij} b_i^+ b_i b_j^+ b_j + \chi a^{+2} a^2, \end{aligned}$$

که در آن a (a^+) و b_i (b_i^+) به ترتیب عملگرهای آفرینش (نابودی) میدان و اتم در ترازهای اتمی مربوطه

حال که به بردار حالت سامانه به طور صریح دست یافته‌یم، می‌توان کمیت‌های فیزیکی مورد علاقه را محاسبه و بررسی کرد.

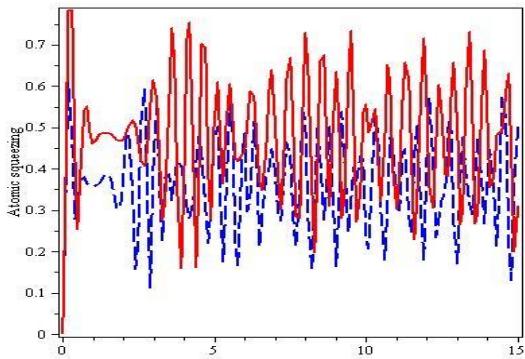
چلاندگی اتمی: به منظور بررسی آمار کوانتومی اتم‌ها در این سامانه، چلاندگی اتم‌ها را محاسبه می‌کنیم. در سامانه‌های متشکل از تعداد زیادی از اتم‌ها، چلاندگی اتمی بر حسب عملگر تکانه زاویه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود [۷]:

$$\eta = \frac{2j\langle \Delta J_z^2 \rangle}{j^2 - \langle J_z \rangle^2}. \quad (10)$$

اگر $\eta < 1$ باشد، حالت اتمی سامانه مورد نظر چلاند است. به منظور انجام محاسبات عددی کمیت مورد نظر، اتم‌ها را در حالت برانگیخته و میدان را به صورت همدوس لحظه می‌کنیم:

$$\begin{aligned} |\Phi(0)\rangle &= |a, \alpha\rangle = |a\rangle \otimes |\alpha\rangle, \\ |\alpha\rangle &= e^{-\frac{|\alpha|^2}{2}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle, \quad \bar{n} = |\alpha|^2. \end{aligned} \quad (11)$$

شکل ۲ اثر محیط کر بر چلاندگی اتمی در حالت غیرتشدید را نشان می‌دهد.



شکل ۲: وابستگی زمانی چلانگی اتمی به ازای مقادیر $N = 10, \bar{n} = 2.5, g = \lambda = 1$ در حالت غیرتشدید در حضور محیط کر (خط چین) و در غیاب آن (خط پیوسته). همان‌طور که ملاحظه می‌شود حضور محیط کر در برهم‌کنش سبب کاهش مقدار چلاندگی اتمی می‌شود که به معنای چلاندگی بیشتر اتم‌های موجود در سامانه است. با شکل ۳ به ازای مقادیر مشابه با شکل ۲ رسم شده ولی شدت میدان اولیه در آن از $\bar{n} = 2.5$ به $\bar{n} = 12.5$ افزایش یافته و منجر به مشاهده این پدیده کاملاً کوانتومی شده است. با افزایش شدت میدان اولیه رفتار چلاندگی اتمی از

حال بردار حالت سامانه را با استفاده از برهم‌نهی $\sum_{N_1} |N_1, N-N_1\rangle$

حالات اخلاف عددی $N_1 + N_2 = N$ و همچنین کت‌های حالت عملگرهای

تکانه زاویه‌ای به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$|\Phi(t)\rangle = \sum_n C_{a,n}(t) |a, n\rangle + C_{b,n+1}(t) |b, n+1\rangle, \quad (6)$$

$$|a\rangle = |j, m+1\rangle, \quad |b\rangle = |j, m\rangle, \quad j = \frac{N}{2}, \quad m = -\frac{N}{2}.$$

در اینجا $|a, n\rangle$ توصیف کننده حالتی است که اتم در حالت برانگیخته و n فوتون در میدان حضور دارد و $|b, n+1\rangle$ نشان دهنده حالتی است که اتم در حالت پایه و $n+1$ فوتون در میدان است. به کمک معادله شروددینگر واپسیت به زمان:

$$i \frac{\partial}{\partial t} |\Phi(t)\rangle = H_F |\Phi(t)\rangle,$$

دو معادله دیفرانسیل مربوط به دامنه‌های احتمال در

(6) به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \dot{C}_{a,n} &= -iAC_{a,n} - iKC_{b,n+1}, \\ \dot{C}_{b,n+1} &= -iBC_{b,n+1} - iKC_{a,n}, \end{aligned} \quad (7)$$

با حل این دستگاه معادلات جفت‌شده، ضرایب بسط

بدین ترتیب به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} C_{a,n} &= [(\cos(\frac{\Omega t}{2}) - \frac{i\delta}{\Omega} \sin(\frac{\Omega t}{2})) C_{a,n}(0) \\ &\quad - \frac{2iK}{\Omega} \sin(\frac{\Omega t}{2}) C_{b,n+1}(0)] \exp(\frac{i\delta t}{2}), \\ C_{b,n+1} &= [(\cos(\frac{\Omega t}{2}) + \frac{i\delta}{\Omega} \sin(\frac{\Omega t}{2})) C_{b,n+1}(0) \\ &\quad - \frac{2iK}{\Omega} \sin(\frac{\Omega t}{2}) C_{a,n}(0)] \exp(-\frac{i\delta t}{2}), \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن از پارامترهای تعریف شده زیر استفاده شده است:

$$\begin{aligned} A &= \left(\frac{1}{2}\Omega_3 - \Omega_1 \right)(m+1) + \frac{1}{2}\Omega_1 n(m+1) \\ &\quad + \frac{\lambda}{4} (2(m+1)^2 - 2(N-1)(m+1)) + \chi(n^2 - n), \\ B &= \left(\frac{1}{2}\Omega_3 - \Omega_1 \right)m + \frac{1}{2}\Omega_1 m(n+1), \\ &\quad + \frac{\lambda}{4} (2m^2 - 2(N-1)m) + \chi((n+1)^2 - (n+1)), \\ K &= g \sqrt{(n+1)(j(j+1) - m(m+1))}, \\ \Omega &= \sqrt{\delta^2 + 4K^2}, \\ \delta &= A - B. \end{aligned} \quad (9)$$

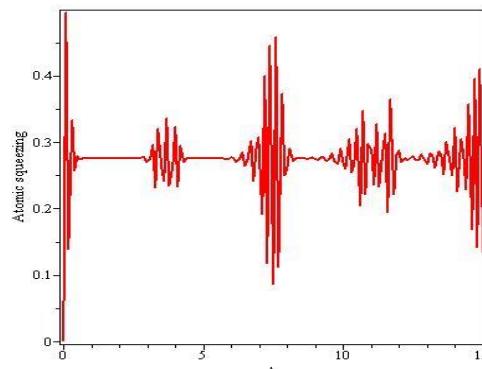
اثر برخوردهای میان اتمی بر تحول زمانی چلاندگی میدان در شکل ۴ رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در غیاب این برخوردها ($\lambda = 0$) میدان چلاندگی نیست زیرا مقدار کوادراتور میدان همواره مثبت است اما با در نظر گرفتن برخوردهای میان اتمی فوتون‌های میدان چلاندگی می‌شوند.

نتیجه‌گیری: با استفاده از مدل دیک و رهیافت دامنه احتمال، آمار کوانتوسی خروجی یک لیزر اتمی سه‌ترازی را در حضور یک محیط کر مورد ارزیابی قرار دادیم. نتایج نشان داد که برهم‌کنش‌های غیرخطی مانند محیط کر و برخوردهای میان اتمی در نظر گرفته شده در این مدل سبب ایجاد چلاندگی در خروجی لیزر اتمی می‌شود. هم‌چنان، میزان چلاندگی اتمها و فوتون‌ها میدان را می‌توان با تغییر پارامترهای موجود در مدل در نظر گرفته شده مانند ثابت جفت‌شدگی میان اتمی و قدرت برهم‌کنش محیط کر کنترل کرد. رفتار چلاندگی اتمی به ازای شدت پایین میدان اولیه به صورت نوسانی است و با افزایش شدت میدان، پدیده فروافت-احیا در رفتار چلاندگی اتمی قابل مشاهده است. به علاوه، پدیده فروافت-احیا که یک پدیده کوانتوسی محض محسوب می‌شود را می‌توان در رفتار چلاندگی اتمی مشاهده کرد. هم‌چنان، اثر محیط کر بر چلاندگی میدان و تاثیر برخوردهای میان اتمی بر چلاندگی اتمی نیز نشان دهنده افزایش میزان چلاندگی در خروجی لیزر اتمی است که نتایج عددی آن در این مقاله (به علت محدودیت جا) ارائه نشده است.

مراجع

- [1] D. F. Walls, *Nature* **306** 141 (1983).
- [2] R. London and P. L. Knight, *J. Mod. Opt.* **34** 709 (1987).
- [3] B. Yurke, *Phys. Rev. A* **29** 408 (1984).
- [4] E. Ghasemian, M. K. Tavassoly, *Phys. Lett. A*, **380** 3262 (2016).
- [5] E. Ghasemian, M. K. Tavassoly, *Laser Phys.* **27** 095202 (2017).
- [6] L. M. Kuang, L. Zhou, *Phys. Rev. A* **68** 043606 (2003).
- [7] H. Pu, G. Moore and P. Meystre “Selected paper of the first International Meeting in Quantum Optics Held in Santiago”, Chile, 13-16 August (2000).
- [8] O. Marian, M. Scully and S. Zubairy, *Quantum Optics*, Cambridge University Press, (1997).

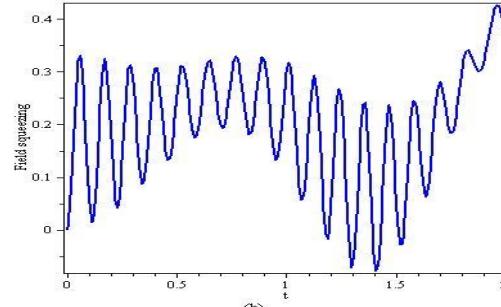
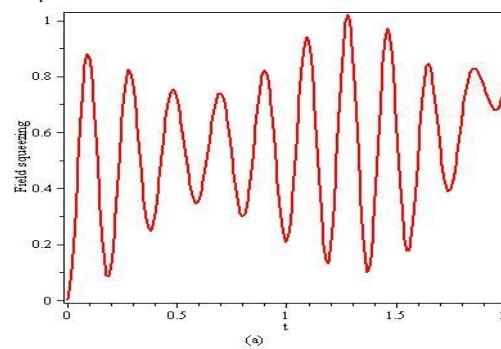
حالت نوسانی خارج شده و پدیده فروافت-احیا ظاهر می‌شود.



شکل ۳: وابستگی زمانی چلاندگی اتمی به ازای مقادیر $N = 10$, $n = 2.5$, $g = \chi = \lambda = 1$ در حالت غیرتشدید.

چلاندگی میدان: به منظور استخراج ویژگی‌های غیرکلاسیکی فوتون‌های میدان کوانتوسی، چلاندگی آنها را مورد بررسی قرار می‌دهیم. چلاندگی کوادراتورهای میدان:

$$\begin{aligned} X_1 &= a + a^+, \quad X_2 = (a - a^+)/i, \\ &\text{به صورت زیر تعریف می‌شود [۸]:} \\ S_1 &= 2\langle a^+a \rangle + 2\langle a \rangle^2 - 4(\text{Re}\langle a \rangle)^2, \\ S_2 &= 2\langle a^+a \rangle - 2\langle a \rangle^2 - 4(\text{Im}\langle a \rangle)^2, \quad (13) \\ S_i &< 0, \quad i = 1, 2. \end{aligned}$$



شکل ۴: تحول زمانی چلاندگی میدان در غیاب برخوردهای میان اتمی (a) و در حضور آنها (b). مقادیر منفی پارامتر S_1 میدان نشان دهنده چلاندگی میدان در X_1 است.