

## تولید حالت‌های درهم تنیده‌ی دو اتم 3 ترازوی در دو کاواک با روش گذار بی دررو کسری همراه با

## اثرات ناهمدوسی

امنیت طلب، مهدی<sup>1</sup>؛ ملوکی، لیدا<sup>2</sup>؛ سعادت‌نیاری، مقصود<sup>1</sup><sup>1</sup> گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، صندوق پستی 165، ارومیه<sup>2</sup> گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ارومیه، ارومیه

## چکیده

در این مقاله، یک طرحواره نسبتاً "زورمند" برای ایجاد حالت‌های درهم تنیده دو اتم 3 ترازوی نوع  $\Lambda$ ، که به طور مجزا در دو کاواک قرار دارند، با استفاده از روش گذار بی دررو کسری پیشنهاد می‌کنیم. اثر اتلاف کاواک و تار نوری و گسیل خود به خودی اتمها، با استفاده از روش گذار بی دررو و طراحی مناسب پالس‌ها تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

## Creation of entangled states of two three-level atoms in two cavity via adiabatic passage considering decoherence effects

Amniat-Talab, Mahdi<sup>1</sup>; Molouki, Lida<sup>2</sup>; Saadati Niari, Maghsud<sup>1</sup><sup>1</sup> Department of Physics, Faculty of sciences, Urmia University, P.B. 165, Urmia, Iran.<sup>2</sup> Department of Physics, Islamic Azad University, Urmia, Iran

## Abstract

We propose a relatively robust scheme to generate entangled states among spatially separated  $\Lambda$  – type atoms via fractional adiabatic passage. The atomic spontaneous radiation, the cavity decay, and the fiber loss are efficiently suppressed by employing adiabatic passage and appropriately designed atom-field couplings.

PACS No.: 32

اپتیکی پیشنهاد شده است. در این مقاله با در نظر گرفتن 2 اتم 3 ترازوی در 2 کاواک مجزا و یک تار نوری که این کاواک‌ها را به هم وصل می‌کند و با استفاده از روش گذار بی دررو کسری، طرحواره-ی جدیدی برای ایجاد حالت‌های درهم تنیده 2 اتم ارائه شده است.

## ساختار سیستم

ابتدا 2 اتم 3 ترازوی در 2 کاواک مجزا را در نظر می‌گیریم که هر

## مقدمه

در هم تنیدگی کوانتومی<sup>1</sup>، یکی از جنبه‌های غیر کلاسیکی یک سیستم کوانتومی  $N$  جزئی است. حالت یک سیستم را زمانی درهم تنیده گویند که، نتوان آن را به صورت حاصلضرب تانسوری حالات زیرسیستم تشکیل دهنده نوشت. حالت‌های درهم تنیده، اساس رمزنگاری کوانتومی [۱] و ارسال کوانتومی [۲] را تشکیل می‌دهند. در زمینه الکتروپدینامیک کوانتومی<sup>2</sup> طرحواره‌های متعددی برای ایجاد حالت‌های درهم تنیده 2 اتم پیشنهاد شده است [۳-۴]. اخیراً در مرجع [۵]، حالت‌های درهم تنیده، برای 2 اتم 3 ترازوی  $\Lambda$  - گونه با روش گذار بی دررو کسری در یک کاواک

باتوجه به شکل 2 زیر فضای جدید  $S$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$S = \{|\Phi_1\rangle, |\Phi_2\rangle, |\Phi_3\rangle, |\Phi_4\rangle, |\Phi_5\rangle, |\Phi_6\rangle, |\Phi_7\rangle\} \quad (2)$$

$$|\Phi_1\rangle = |sg\rangle_a |00\rangle_c |0\rangle_f$$

$$|\Phi_2\rangle = |eg\rangle_a |00\rangle_c |0\rangle_f$$

$$|\Phi_3\rangle = |gg\rangle_a |10\rangle_c |0\rangle_f$$

$$|\Phi_4\rangle = |gg\rangle_a |00\rangle_c |1\rangle_f$$

$$|\Phi_5\rangle = |gg\rangle_a |01\rangle_c |0\rangle_f$$

$$|\Phi_6\rangle = |ge\rangle_a |00\rangle_c |0\rangle_f$$

$$|\Phi_7\rangle = |gs\rangle_a |00\rangle_c |0\rangle_f$$

در روابط بالا  $|m_1, m_2\rangle_a$ ،  $(m_{1,2} = g, s, e)$  نشان دهنده حالت اتم‌های موجود در کاواک 1 و 2،  $|n_1, n_2\rangle_c$  نشان‌دهنده حالت میدان با  $n_1$  فوتون در مد کاواک 1 و  $n_2$  فوتون در مد کاواک 2 و  $|n_f\rangle_f$  نشان دهنده  $n_f$  فوتون در مد تار نوری می‌باشد. اگر حالت اولیه سیستم،  $|\Phi_1\rangle$  در نظر گرفته شود، هامیلتونی سیستم در زیر فضای جدید  $S$  به صورت رابطه (3) خواهد بود.

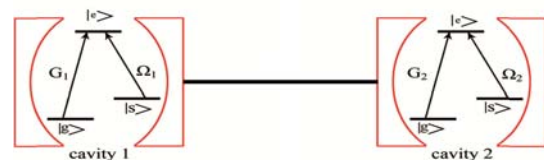
$$H = \begin{bmatrix} 0 & \Omega_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Omega_1 & 0 & G_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_1 & 0 & G_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_1 & 0 & G_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_2 & 0 & G_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_2 & 0 & \Omega_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Omega_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ویژه حالت مربوط به ویژه مقدار صفر برای هامیلتونی رابطه (3)، که اصطلاحاً "حالت تاریک نامیده می شود، به صورت زیر است:

کدام از اتمها با میدان کوانتومی یک کاواک اندرکنش می‌کنند و کاواک‌ها از طریق یک تار نوری به هم وصل شده اند. هامیلتونی چنین سیستمی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$H(t) = \sum_{i=1,2} [G_i(t) a_i |e\rangle_i \langle g| + \Omega_i(t) |e\rangle_i \langle s|] + \nu b (a_1^+ + a_2^+) + H.C \quad (1)$$

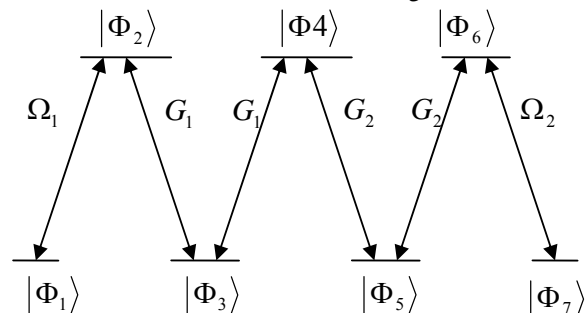
در رابطه بالا، اندیس  $i$  نشان دهنده شماره اتم،  $a_i^+$  و  $a_i$  نشان دهنده عملگرهای خلق و فنا برای مد کاواک،  $G_i$  نشان دهنده فرکانس رابی اندرکنش اتم  $i$ ام با مد کاواک  $i$ ام،  $\Omega_i$  نشان دهنده فرکانس رابی اندرکنش اتم  $i$ ام با میدان کلاسیکی  $i$ ام،  $b$  عملگر فنا برای فوتونهای موجود در مد تار نوری،  $\nu$  قدرت جفت شدگی بین مد تار نوری و مد کاواک می‌باشد. طرح این سیستم در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1: دو اتم نوع  $\Lambda$  که به طور مجزا در دو کاواک قرار دارند. دو کاواک توسط یک تار نوری به هم وصل شده اند.

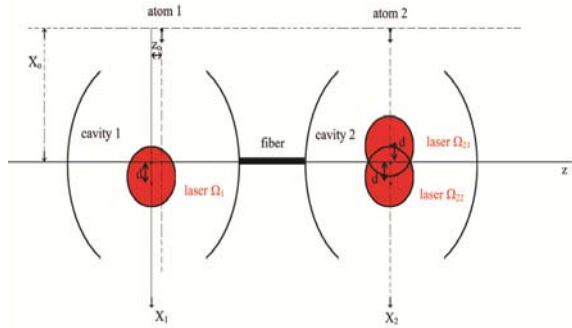
### درهم تنیدگی اتم - اتم

برای ایجاد حالت درهم تنیده 2 اتم برهم کنش کننده با 2 کاواک مجزا، الگوی جفت شدگی اتم 1- اتم 2- کاواک 1- کاواک 2- تار نوری به صورت شکل زیر خواهد بود.



شکل 2: الگوی جفت شدگی اتم 1- اتم 2- کاواک 1- کاواک 2- تار نوری.

کاواک اپتیکی دوم که در حالت  $|0\rangle$  قرار دارد و سپس از میدانهای لیزری  $\Omega_{21}(t), \Omega_{22}(t)$  عبور می کند.



شکل 3: نمای هندسی سیستم موردنظر در شکل پیشنهادی نشان داده شده است.

اتم های متحرک با پالس های وابسته به زمان و تأخیری مد کاواک و میدان لیزری مواجه می شوند.

(9)

$$G_1(t) = G_0 e^{\left(\frac{-(vt)^2}{w_c^2}\right)} \cos\left(\frac{2\pi z_0}{\lambda}\right)$$

(10)

$$\Omega_1(t) = \Omega_0 \sin \theta e^{\left(\frac{-z_0^2}{w_l^2}\right)} e^{\left(\frac{-(vt-d)^2}{w_l^2}\right)}$$

$$G_2(t) = G_0 e^{\left(\frac{-v^2(t-\tau)^2}{w_c^2}\right)} \quad (11)$$

(12)

$$\Omega_2(t) = \Omega_{21}(t) + \Omega_{22}(t)$$

(13)

$$\Omega_{21}(t) = \Omega_0 e^{\left(\frac{-[v(t-\tau)+d]^2}{w_l^2}\right)}$$

(14)

$$\Omega_{22}(t) = \Omega_0 \cos \theta e^{\left(\frac{-[v(t-\tau)-d]^2}{w_l^2}\right)}$$

در روابط بالا،  $G_0, \Omega_0, \Omega_0 \sin \theta, \Omega_0 \cos \theta$  بیشینه دامنه ها،  $\tau$  تاخیر زمانی پالس ها،  $w_l, w_c$  به ترتیب، کمر باریکه مد کاواک و لیزر می باشند. در شکل 4 نمودار جمعیت بر حسب زمان و همچنین پالس بر حسب زمان برای پارامترهای  $d = 3 \mu m$

$$\Omega_0 = 5 \left(\frac{v}{w_l}\right), \quad \theta = \pi/4, \quad \tau = 0, \quad z_0 = 0$$

$$|D\rangle = K[G_1(t)\Omega_2(t)|\Phi_1\rangle - \Omega_1(t)\Omega_2(t)|\Phi_3\rangle + \Omega_1(t)\Omega_2(t)|\Phi_5\rangle - G_2(t)\Omega_1(t)|\Phi_7\rangle] \quad (4)$$

که در این رابطه  $G_i$  و  $K = \frac{1}{\sqrt{G_1^2 \Omega_2^2 + 2\Omega_2^2 \Omega_1^2 + G_2^2 \Omega_1^2}}$  و  $\Omega_i$  اعداد حقیقی انتخاب می شوند.

برای انتقال حالتها بدون آثار ناهمدوسی باید شرط زیر برقرار باشد:

$$G_1(t), G_2(t) \geq \Omega_1(t), \Omega_2(t) \quad (5)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$|D(t)\rangle = G_1(t)\Omega_2(t)|\Phi_1\rangle - G_2(t)\Omega_1(t)|\Phi_7\rangle \quad (6)$$

و در نهایت ایجاد حالت درهم تنیده 2 اتم، با برقراری شرایط زیر برای ویژه حالت تاریک  $|D\rangle$ ، امکان پذیر می باشد:

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} \frac{G_2(t)\Omega_1(t)}{G_1(t)\Omega_2(t)} = 0, \quad \rightarrow |D(t)\rangle = |\Phi_1\rangle, \quad (7)$$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{G_2(t)\Omega_1(t)}{G_1(t)\Omega_2(t)} = \tan \theta,$$

$t \rightarrow +\infty$

(8)

$$\rightarrow |D(t)\rangle = (\cos \theta |\Phi_1\rangle - \sin \theta |\Phi_7\rangle)$$

رابطه (8)، حالت درهم تنیده 2 اتم 3 تراز را نشان می دهد. در ادامه، برای بررسی عددی پالسهای  $\Omega_i(t)$  و  $G_i(t)$ ، ساختار شماتیک سیستم در شکل 3 نشان داده شده است.

مطابق این شکل اتم اول، نخست در حالت  $|S\rangle$  قرار دارد و با سرعت  $v$  (روی صفحه  $y = 0$  و خط  $z = z_0$ ) از میان کاواک اپتیکی اول که در حالت  $|0\rangle$  قرار دارد و سپس از میدان لیزری  $\Omega_1(t)$  که موازی محور  $y$  می باشد عبور می کند. فاصله بین مرکز کاواک و محور لیزر برابر  $d$  است. اتم دوم نیز که نخست در حالت  $|g\rangle$  قرار دارد، با همان سرعت  $v$  روی صفحه  $(y = 0)$  و خط  $(z = 0)$  در همان جهت (با توجه به اتم اول)، از میان

با توجه به شکل‌های بالا در می‌یابیم که، کم و زیاد شدن نرخ گسیل خود به خودی بر روی انتقال یکسان جمعیت تاثیر دارد و افزایش و کاهش گسیل از حالت متداول، باعث می‌شود که جمعیت‌ها به طور یکسان بین ترازهای 1 و 7 تقسیم نشود.

### نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش جدید برای ایجاد حالت‌های در هم تنیده دو اتم موجود در دو کاواک مجزا پیشنهاد شده است. با طراحی مناسب پالس‌ها، حالت‌های  $|\Phi_3\rangle$  و  $|\Phi_4\rangle$  که هر کدام یک فوتون در هر یک از کاواکها دارند و با استفاده از روش گذار بی دررو، حالت‌های برانگیخته  $|\Phi_2\rangle$  و  $|\Phi_6\rangle$  و همچنین حالت  $|\Phi_4\rangle$  که یک فوتون در تار نوری دارد، در طول تحول زمانی سیستم جمعیت دار نمی‌شوند، لذا اساساً آثار ناهمدوسی تا حدی کاهش می‌یابند و حالت‌های در هم تنیده تولید می‌شوند. همچنین در نهایت، تاثیر افزایش و یا کاهش نرخ گسیل خود به خودی بر روی تقسیم جمعیت ترازهای 1 و 7 بررسی شده است.

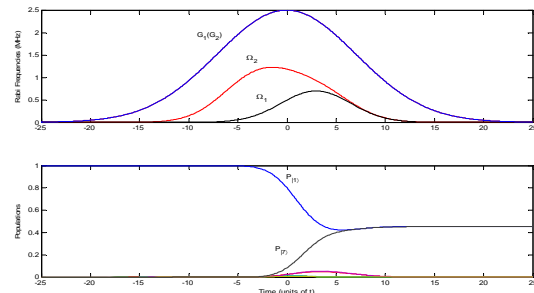
### مرجع‌ها

- [1] A. K. Ekert, *phys. Rev. Lett.* **67** (1991) 661.
- [2] C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crepeau, R. Jozsa, A. Peres, W. K. Wootters, *Phys. Rev. Lett.* **70** (1993) 1895.
- [3] A. S. Sørensen and K. Mølmer, *Phys. Rev. Lett.* **90**, (2003) 127903.
- [4] C. Marr, A. Beige and G. Rempe, *Phys. Rev. A* **68** (2003) 033817.
- [5] M. Amniet-Talab, S. Guérin and H. R. Jauslin, *Phys. Rev. A* **72** (2005) 012339.

1. Entanglement.
2. Quantum Electrodynamics.

$$W_l = 5\mu\text{m}, W_c = 10\mu\text{m}, v = 1\text{m/s}, G_0 = 25\left(\frac{v}{W_c}\right)$$

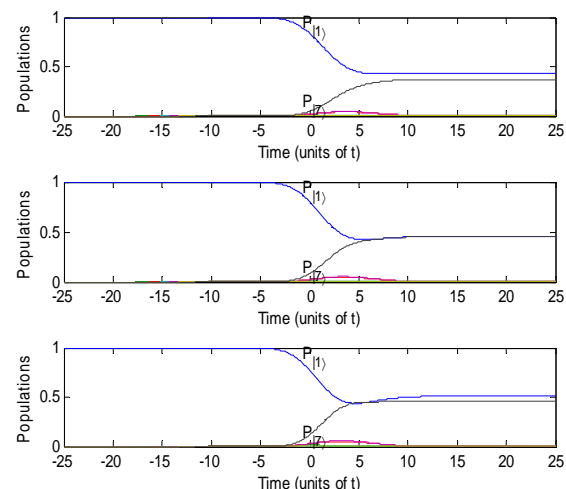
$\lambda = 852.36\text{nm}$  رسم شده است.



شکل 4: (بالا): فرکانس‌های رابی میدان‌های کاواک و لیزری، پایین): تحول زمانی جمعیت ترازها.

### تاثیر گسیل خود به خودی بر روی جمعیت

همانطور که قبلاً فرض کردیم، گسیل خود به خودی به سمت خارج از سیستم می‌باشد. کم و زیاد شدن نرخ گسیل خود به خودی بر روی انتقال جمعیت تاثیر می‌گذارد. شکل (5) نمودار جمعیت نهایی ترازها را برای سه نرخ گسیل خود به خودی متفاوت  $\Gamma = 1$  و  $\Gamma = 0.4$  و  $\Gamma = 0.08$  (به ترتیب از بالا به پایین) نشان می‌دهد.



شکل 5: نمودار جمعیت نهایی ترازها برای سه نرخ گسیل متفاوت  $\Gamma = 1, 0.4, 0.08\left(\frac{v}{W_l}\right)$  مطابق پارامترهای مورد استفاده در شکل