

دینامیک یک چگالیده بوز-اینشتین در برهم کنش با میدان کوانتومی غیرخطی در حضور اثر اشتارک

ابراهیم قاسمیان*، محمد کاظم توسلی

گروه اپتیک و لیزر، دانشکده فیزیک دانشگاه یزد

چکیده: در این مقاله یک الگوی دیک تعمیم یافته برای برهم کنش یک چگالیده اتمی با یک میدان کوانتومی غیرخطی با در نظر گرفتن اثر اشتارک ارائه می کنیم. دینامیک سامانه را با در نظر گرفتن دو میدان فوتونی اولیه متفاوت، میدان همدوس و چلانده، مورد مطالعه قرار می دهیم. نتایج نشان می دهد که تحول دینامیکی سامانه با تنظیم پارامترهای توصیف کننده برهم کنش های در نظر گرفته شده قابل کنترل است. برای نمونه، ترازهای انرژی را می توان با لحاظ کردن اثر اشتارک دستکاری و جابجا کرد. همچنین، پدیده کوانتومی فروافت-احیا در رفتار وارونی جمعیت، به ویژه با در نظر گرفتن میدان اولیه همدوس، قابل مشاهده است. چلانگی کوتاه مدتی نیز در کوادراتورهای میدان رخ می دهد و در غیاب و حضور اثر اشتارک بین کوادراتورهای میدان تبادل می شود.

کلید واژگان: اثر اشتارک؛ چگالیده بوز-اینشتین؛ وارونی جمعیت اتمی؛ چلانگی میدان.

Dynamics of an atomic Bose-Einstein condensate interacting with nonlinear quantized field under the influence of Stark effect

Ebrahim Ghasemian, Mohammad Kazem Tavassoly

Optics and Laser Group, Faculty of Physics, Yazd University

Abstract- In this paper we present a generalized Dicke model for the interaction between an atomic Bose-Einstein condensate with a nonlinear quantized field in the presence of Stark effect. We study the dynamics of the system by considering two different initial photonic states i.e., coherent and squeezed field. Our results show that the dynamical evolution of the system can be controlled by tuning the parameters describing the considered interactions. For instance, the energy levels can be manipulated and shifted by considering the Stark effect. Also, collapse-revival phenomenon can be observed in the patterns of atomic inversion, specially, in case of initial coherent state. Short time squeezing takes place in the field quadratures and can be exchanged between them in the absence or presence of Stark effect.

Keywords: Stark effect, Bose-Einstein condensate; Atomic population inversion; Field squeezing.

* e.ghasemian@stu.yazd.ac.ir

برهم‌کنش نور و ماده یکی از شاخه‌های اساسی پژوهش در زمینه فیزیک اتمی است. امروزه وجود لیزرهای با توان بالا منجر به دستاوردهای جدیدی در زمینه فیزیک اتمی، بویژه اپتیک کوانتومی، شده است. برهم‌کنش‌های غیرخطی میان اتم‌ها و میدان‌های کوانتومی منجر به مشاهده پدیده‌های کوانتومی و ویژگی‌های غیرکلاسیکی نظیر چلاندگی در این سامانه‌ها می‌شود. آنها در مخابرات نوری و آشکارسازی امواج گرانشی استفاده می‌شود [۱-۲]. در این مقاله، دینامیک یک سامانه متشکل از اتم‌های بوزونی برهم‌کنش‌کننده با یک میدان کوانتومی غیرخطی را با در نظر گرفتن اثر اشتراک مطالعه می‌کنیم.

معرفی سامانه و حل معادلات دینامیکی آن

یک سامانه متشکل از N اتم بوزونی دوترازی، یک چگالیده بوز-اینشتین را در نظر می‌گیریم که با یک میدان کوانتومی غیرخطی در حال برهم‌کنش است. در این سامانه، علاوه بر برهم‌کنش اتم-میدان و برخوردهای میان‌اتمی، اثر اشتراک را نیز در نظر می‌گیریم. هامیلتونی سامانه در تقریب موج چرخان به صورت زیر است [۳].

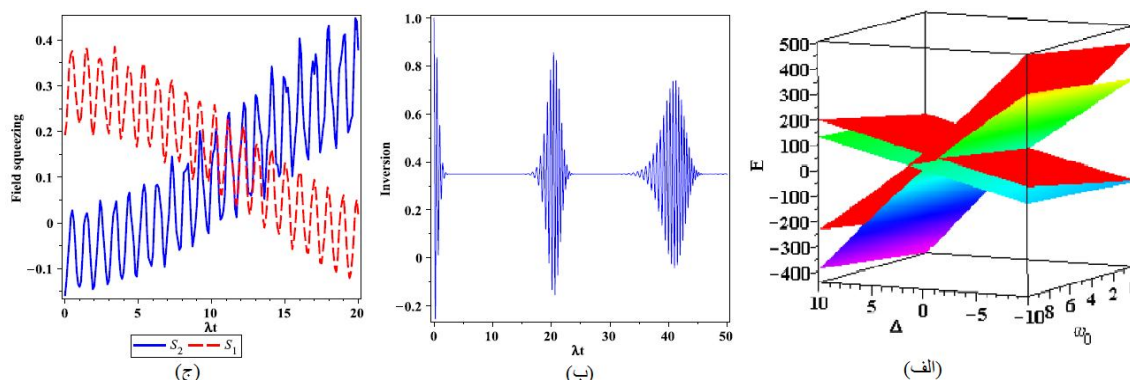
$$H = \Omega A^\dagger A + \omega_0 J_z + \frac{c}{N} J_z^2 + \frac{\lambda}{\sqrt{N}} (A^\dagger J_- - A J_+) + \delta A^\dagger A J_z, \quad (1)$$

که در آن A و $A^\dagger$ بترتیب عملگرهای نابودی و آفرینش میدان تابشی هستند و $J_i, i = z, +, -$ عملگرهای تکانه زاویه‌ای توصیف‌کننده دینامیک اتم‌های بوزونی در سامانه هستند. جمله‌های اول و دوم هامیلتونی (۱) بترتیب هامیلتونی‌های آزاد میدان کوانتومی غیرخطی و اتم‌ها در چگالیده را معرفی می‌کنند. همچنین، جمله سوم و چهارم بترتیب برخوردهای میان‌اتمی درون سامانه و برهم‌کنش اتم‌ها با میدان کوانتومی را توصیف می‌کنند و جمله آخر بیانگر اثر اشتراک است. در رابطه (۱) میدان کوانتومی غیرخطی با استفاده از عملگرهای استاندارد میدان بوزونی و تابع غیرخطی $f(n)$ که وابسته به شدت میدان $n = a^\dagger a$ است، در نظر گرفته می‌شود. همچنین، $\Omega = \omega_c + N/2(\gamma_1 + \gamma_2)$ بسامد میدان کوانتومی است که در حضور اثر اشتراک تعدیل شده است و $\delta = \gamma_2 - \gamma_1$ اختلاف ضرایب اشتراک مربوط به اتم‌های دوترازی است. اکنون، بردار حالت سامانه را با استفاده از ویژه‌حالت‌های عملگرهای تکانه زاویه‌ای به صورت زیر در نظر می‌گیریم،

$$|\Phi(t)\rangle = \sum_n C_{a,n}(t) |a, n\rangle + C_{b,n+1}(t) |b, n+1\rangle, \quad |a\rangle = |j, m+1\rangle, \quad |b\rangle = |j, m\rangle, \quad j = \frac{N}{2}, \quad m = -\frac{N}{2}. \quad (2)$$

با استفاده از معادله شرودینگر وابسته به زمان، بردار حالت سامانه را بصورت تحلیلی بدست می‌آوریم و دینامیک سامانه را مورد بررسی قرار دهیم.

دینامیک سامانه: ابتدا اثر اشتراک را بر ترازهای انرژی سامانه مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای این منظور ویژه‌مقادیر انرژی سامانه را بدست می‌آوریم و آنها را در حضور و در غیاب اثر اشتراک با هم مقایسه می‌کنیم. شکل ۱ (الف) نشان می‌دهد که اثر اشتراک علاوه بر جابجایی ترازهای انرژی، شیب آنها را نیز تغییر می‌دهد.



شکل ۱- (الف) جابجایی ترازهای انرژی سامانه در حضور اثر اشتراک. سطوح با شیب‌های مثبت و منفی بترتیب مربوط به شرایط حضور و غیاب اثر اشتراک هستند که به ازای $N = 10$ رسم شده است. (ب) نمودار تغییرات وارونی جمعیت در حالت همدوس به ازای $n = 10$. (ج) تحول زمانی چلانگی میدان در حضور اثر اشتراک و برخوردهای میان‌اتمی $c = \lambda$ که به ازای پارامتر چلانگی $r = 0.5$ رسم شده است. دیگر پارامترهای عددی بدون بعد هستند و تابع غیرخطی $f(n) = \sqrt{1+n}$ نیز برای ایجاد میدان غیرخطی در محاسبات در نظر گرفته شده است.

وارونی جمعیت اتمی: در این بخش، وارونی جمعیت اتمی، به عنوان یک پارامتر کلیدی برای بررسی دینامیک اتم‌های موجود در سامانه، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این کمیت بصورت زیر تعریف می‌شود،

$$W(t) = \sum_{n=0}^{\infty} P(n) \left[\frac{\Delta_n^2}{\Omega_n^2} + \frac{4K_n^2}{\Omega_n^2} \cos \Omega_n \right], \quad (3)$$

که $P(n)$ تابع توزیع فوتونی مربوط به حالت اولیه میدان است و بقیه پارامترها از حل معادله شرودینگر بدست می‌آیند. در شکل ۱ (ب) نمودار تغییرات وارونی جمعیت در حالت همدوس در حضور اثر اشتراک رسم شده است. پدیده فروافت-احیا در رفتار وارونی جمعیت بوضوح مشاهده می‌شود. همچنین، میانگین دامنه وارونی مقدار مثبتی که بدین مفهوم است که اثر اشتراک سبب افزایش برانگیختگی در سامانه می‌شود.

چلانگی میدان: به منظور استخراج ویژگی‌های غیرکلاسیکی فوتون‌های میدان کوانتومی، چلانگی آنها را مورد بررسی قرار می‌دهیم. شکل ۱ (ج) تحول زمانی کوادراتورهای میدان را در حضور اثر اشتراک با در نظر گرفتن حالت اولیه چلانده را نشان می‌دهد. در این نمودار، مقادیر منفی نشان‌دهنده ایجاد چلانگی در سامانه است. جالب توجه است که در حضور اثر اشتراک و با گذشت زمان از میزان چلانگی کوادراتور دوم کاسته (مثبت‌تر) و بر چلانگی کوادراتور اول افزوده (منفی‌تر) می‌شود که نشان‌دهنده تبادل چلانگی بین کوادراتورهای میدان است.

نتیجه‌گیری: اثر اشتراک در سامانه‌های متشکل از چگالیده‌های اتمی برهم‌کنش‌کننده با میدان‌های کوانتومی، ترازهای انرژی را جابجا می‌کند. همچنین، این اثر (اشتراک) سبب افزایش برانگیختگی، ایجاد و تبادل چلانگی بین کوادراتورهای میدان کوانتومی می‌شود. پدیده کوانتومی فروافت-احیا نیز در سامانه مورد مطالعه بوضوح قابل مشاهده است.

مراجع

1. D. F. Walls, **Nature** **306** 141 (1983).
2. R. London and P. L. Knight, **J. Mod. Opt.** **34** 709 (1987).
3. A. Salah, A. S. Abdel-Rady, et al, **Scientific Reports** **8**, 11633(2018).