همایش نانوفوتونیک ایران ۱۳۹۹- ۱ و ۲ آبان
Iranian Nano-Photonic Conference 2020
October 23 and 24

دینامیک یک چگالیده بوز-اینشتین در برهم‌کنش 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 تعمیم‌یافته برای برهم‌کنش یک چگالیده اتمی با یک میدان کوانتومی غیرخطی با درنظر گرفتن اثر اشتارک ارائه می‌کنیم. دینامیک سامانه را با در نظر گرفتن دو میدان فوتونی اولیه متفاوت، میدان همدوس و چلانده، مورد مطالعه قرار می‌دهیم. نتایج نشان می‌دهد که تحول دینامیکی سامانه با تنظیم پارامترهای توصیف‌کننده برهم‌کنش‌های در نظر گرفته شده قابل‌کنترل است. برای نمونه، ترازهای انرژی را می‌توان با لحاظ کردن اثر اشتارک دستکاری و جابجا کرد. همچنین، پدیده کوانتومی فروافت-احیا در رفتار وارونی جمعیت، به‌ویژه با در نظر گرفتن میدان اولیه همدوس، قابل مشاهده است. چلاندگی کوتاه مدتی نیز در کوادراتورهای میدان رخ می‌دهد و در غیاب و حضور اثر اشتارک بین کوادراتورهای میدان تبادل می‌شود.

کلید واژگان: اثر اشتارک؛ چگالیده بوز- اینشتین؛ وارونی جمعیت اتمی؛ چلاندگی 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

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13]

مقدمه

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 می‌شوداز 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 اشتارک 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 اشتارک را نیز در نظر می‌گیریم. هامیلتونی سامانه در تقریب موج چرخان به صورت زیر است [۳]،

$$H=\Omega A^{\dagger}A+\omega_0 J_z+\frac{c}{N}J_z^{\,2}+\frac{\lambda}{\sqrt{N}}(A^{\dagger}J_-AJ_+)+\delta A^{\dagger}AJ_z, \qquad (۱)$$

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 استارک 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، $\Omega=\omega_c+N/2(\gamma_1+\gamma_1)$ بسامد میدان کوانتومی است که در حضور اثر اشتارک تعدیل شده است و $\delta=\gamma_2-\gamma_1$ اختلاف ضرایب اشتارک مربوط به اتم‌های دوترازی است. اکنون، بردار حالت سامانه را با استفاده از ویژه‌حالت‌های عملگرهای تکانه زاویه‌ای به صورت زیر در نظر می‌گیریم،

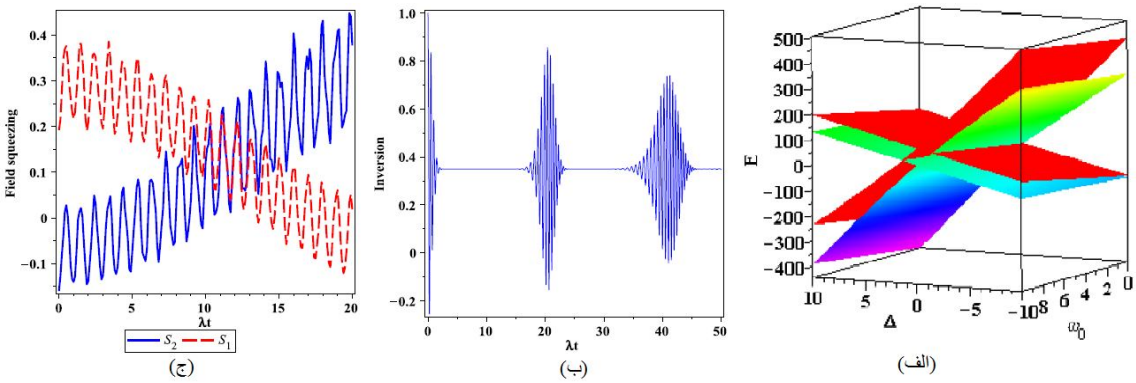
$$|\Phi(t)\rangle=\sum_n C_{a,n}(t)|a,n\rangle+C_{b,n+1}(t)|b,n+1\rangle,\quad |a\rangle=|j,m+1\rangle,\quad |b\rangle=|j,m\rangle,\quad j=\frac{N}{2},\quad m=-\frac{N}{2}. \qquad (۲)$$

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

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13]



شکل ۱- (الف) جابجایی ترازهای انرژی سامانه در حضور اثر اشتارک. سطوح با شیب‌های مثبت و منفی بترتیب مربوط به شرایط حضور و غیاب اثر اشتارک هستند که به ازای $N=10$ رسم شده است. (ب) نمودار تغییرات وارونی جمعیت در حالت همدوس به ازای $\bar{n}=10$. (ج) تحول زمانی چلاندگی میدان در حضور اثر اشتارک و برخوردهای میان‌اتمی $c=\lambda$ که به ازای پارامتر چلاندگی $r=0.5$ 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 می شود،

$$W(t)=\sum_{n=0}^{\infty}P(n)\left[\frac{\Delta_n^2}{\Omega_n^2}+\frac{4K_n^2}{\Omega_n^2}\cos\Omega_n\right], \qquad (۳)$$

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 اشتارک 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 اشتارک سبب افزایش برانگیختگی در سامانه می‌شود.

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

نتیجه گیری : اثر اشتارک در سامانه‌های متشکل از چگالیده‌های اتمی برهم‌کنش‌کننده با میدان‌های کوانتومی، ترازهای انرژی را جابجا می‌کند. همچنین، این اثر (اشتارک) سبب افزایش برانگیختگی، ایجاد و تبادل چلاندگی 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).

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13]