بررسی خواص کوانتومی حالتهای همدوس دو مدی درهمتنیده

ندا غفوریان مومن رضوی ، علی آهنج ، محسن سربیشه ای

دانشگاه خیام مشهد

دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

با توجه به اینکه حالت های همدوس نزدیک ترین حالت های کوانتومی به کلاسیک هستند و درعین حال برهمنهی های حاصل از این حالت ها، خواص غیرکلاسیکی قوی از خود نشان می دهند، مورد توجه بوده اند. به علاوه وجود خواص غیرکلاسیکی برای داشتن همبستگی های کوانتومی بین اجزای سیستم ضروری است. در این مقاله حالت های همدوس درهمتنیده با اختلاف فاز $\frac{\pi}{2}$ را مورد بررسی قرار داده ایم و خواص غیرکلاسیکی از جمله چلاندگی عملگرهای تربیع، توزیع عدد فوتونی نوسانی و خاصیت ضدخوشه ای، همچنین همبستگی های کوانتومی از جمله درهمتنیدگی و دیسکورد را در شرایط مختلف بررسی نموده ایم.

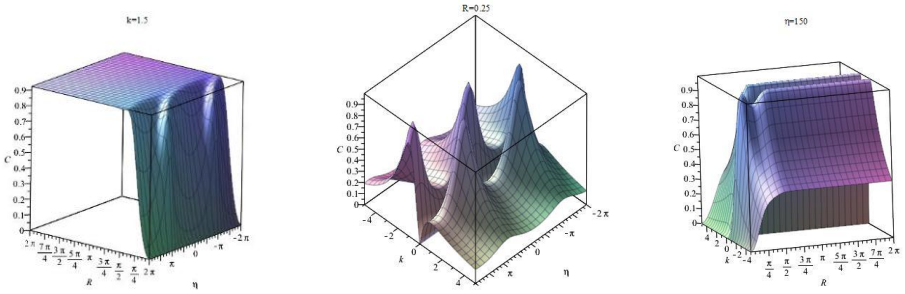
در مبحث اپتیک کوانتومی ، میدان الکترومغناطیسی توسط خواص کوانتومی بررسی می شود. در کلاسیک میدان الکترومغناطیسی شامل امواجی با دامنه و فاز خوش تعریف می باشد. اما در کوانتوم ، هم در دامنه و هم در فاز مقادیری افت و خیز و عدم قطعیت داریم. حالت هایی از میدان که در آنها به کمترین میزان عدم قطعیت ممکن (تا آنجا که کوانتوم اجازه می دهد) می رسیم را حالت های همدوس می گویند و بردار حالت مربوطه را با $|\alpha\rangle$ نمایش می دهند. با متوسط گیری از میدان در این حالت، به رفتاری نوسانی مشابه میدان کلاسیکی ، به همراه مقداری پهن شدگی به دلیل افت و خیزهای کوانتومی میرسیم. به این دلیل حالت های همدوس نزدیک ترین حالت های کوانتومی به کلاسیک به شمار می آیند. با این حال، برهمنهی هایی متشکل از حالت های همدوس خواص غیر کلاسیکی قوی از خود نشان میدهند. به این جهت مطالعه آنها مورد توجه بوده است(۱).

در کوانتوم ، تمام حالت های نور کوانتومی به حساب می آیند، اما برخی حالت ها برخلاف آنچه در مورد حالت های همدوس گفتیم، خواص غیرکلاسیکی بیشتری از خود نشان میدهند. به چند روش میتوانیم خواص غیرکلاسیکی حالت های نور را بررسی کنیم.روش های مورد استفاده در این کار چلاندگی عملگرهای تربیع، توزیع عدد فوتونی نوسانی و خاصیت ضدخوشه ای هستند. اهمیت بررسی این موضوع از آنجاست که میدان نور غیرکلاسیکی هم به طور بنیادی و هم کاربردی ، نقش مهمی در تئوری اطلاعات کوانتومی بازی می کند. بنابراین برای استفاده از یک حالت در اطلاعات کوانتومی، میزان غیرکلاسیکی بودن آن باید مورد بررسی قرار گیرد (۲).

یکی از موضوعات مهم در بحث محاسبات و اطلاعات کوانتومی، همبستگی های کوانتومی می باشند. مشاهده شده است که میزان همبستگی ها در کوانتوم نسبت به کلاسیک بیشتر است. به علاوه وجود همبستگی بین اجزای سیستم می تواند باعث به

وجود آمدن خواص فیزیکی کاملا جدیدی در سیستم مرکب شود که در هر کدام از زیرسیستم ها به طور مجزا وجود ندارد. یکی از معیارهای وجود همبستگی کوانتومی، درهمتنیدگی می باشد که به طور گسترده مورد مطالعه فیزیکدانان بوده است. روش های مختلفی برای بررسی وجود یا عدم وجود و همچنین میزان درهمتنیدگی وجود دارد که در این کار ما از روش توافق استفاده نموده ایم. از طرفی حالت هایی وجود دارند که درهمتنیده نیستند اما میزان همبستگی در آنها باز هم از کلاسیک بیشتر است. درسالهای اخیر معیار دیگری برای همبستگی های کوانتومی به نام دیسکورد معرفی شده است که در این کار به آن پرداخته ایم(۳) و (٤).

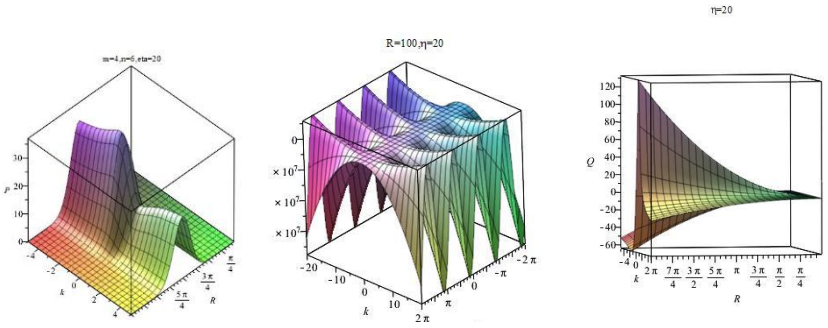
حالت مورد بررسی را به صورت $\psi_{AB} = |\alpha,\alpha\rangle + ke^{i\eta}|i\alpha,i\alpha\rangle$ انتخاب نمودیم. که در آن $|\alpha\rangle$ و $|i\alpha\rangle$ دو حالت همدوس با اختلاف فاز $\frac{\pi}{2}$ می باشند. η اختلاف فاز بین دو کت و k یک مقدار حقیقی است. از طرفی می دانیم α مربوط به حالت همدوس ، یک عدد مختلط است پس میتوانیم آن را به صورت $\alpha = R\,e^{i\theta}$ بنویسیم که در این رابطه ، $|\alpha|^2 = R^2$ برابر با متوسط عدد فوتونی یا میانگین تعداد فوتون های میدان می باشد(۱). به منظور محاسبه درهمتنیدگی به روش توافق، درصورتی که بتوانیم حالت را به فرم استاندارد $\psi = a|00\rangle + b|01\rangle + c|10\rangle + d|11\rangle$ بنویسیم، میتوانیم از رابطه $C = 2|ad - bc|$ استفاده کنیم. به این منظور پس از بررسی استقلال خطی $|i\alpha\rangle$ و $|\alpha\rangle$ ، ψ_{AB} را در پایه های عمود نوشته، آن را به فرم اشمیت بردیم و درهمتنیدگی به روش توافق را برای آن به دست آوردیم(۵).



شکل۱: نمودارهای مربوط به درهمتنیدگی برای سه حالت $\eta = 150$ ، $R = 0.25$ ، $k = 1.5$

نتیجه گیری:

در بررسی روابط به دست آمده مشاهده کردیم که همبستگی های کوانتومی و همچنین اثرات غیرکلاسیکی به جز چلاندگی به فاز حالت همدوس(θ) بستگی ندارند. باتوجه به روابط و نمودارهای مربوط به درهمتنیدگی، مشاهده شد که ماکسیمم درهمتنیدگی می تواند در $k = \pm 1$ رخ دهد که به حدود۱ میرسد. اما در Rهای کوچک، یعنی متوسط عدد فوتونی کوچک، تغییرات در درهمتنیدگی با تغییر k و η بیشتر میشود. حالتهایی دیده میشود که حتی در $k = \pm 1$ به ماکسیمم درهمتنیدگی نمیرسیم. به علاوه دیده میشود که هرچه متوسط عدد فوتونی بزرگتر باشد، تغییر در میزان درهمتنیدگی کمتر است و زوایای بیشتری وجود دارندکه درآنها درهمتنیدگی به بیشینه مقدارممکن میرسد. با میل کردن R به سمت صفر،درهمتنیدگی به صفر میل میکند(شکل۱).



شکل۲: نمودارهای مربوط به خاصیت ضدخوشه ای، چلاندگی، و توزیع احتمال فوتونی نوسانی

با بررسی دیسکورد حالت مربوطه، مشاهده شد که رفتار دیسکورد مشابه رفتار درهمتنیدگی است، با این تفاوت که در تمام نمودارها، مقدار دیسکورد از درهمتنیدگی کمتر است.

بررسی خاصیت ضدخوشه ای نشان داد که با میل کردن R به سمت صفر، این اثر غیرکلاسیکی به سمت صفر میل میکند. در بررسی چلاندگی مشاهده نمودیم که در $k = 0$ چلاندگی، مشابه همسبتگی های کوانتومی، به سمت صفر میل میکند. مشاهده نوسانات در بررسی رفتار تابع توزیع احتمال فوتونی، نشان داد که رفتار پواسونی ندارد و دارای خاصیت غیرکلاسیکی میباشد(شکل۲).

مرجع ها:

۱.Gerry , Knight. *Introductory Quantum Optics*.

2. Nielsen ,Chuang. *Quantum Computation and Quantum Information.*

3. Ahmad et all. *Nonclassical features of entangled coherent states. Journal of modern optics* , ***58:10, 890-895***

4. Mishra et all. *Quantum discord and entanglement of quasi-werner states based on entangled coherent states. eprint* **arXiv:1209.3706**

5. Mann , Sanders , Murnu. *Bell's inequality for an entanglement of nonorthogonal states.* **PRA Vol.51 No.2**