بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

بررسی حالت چگالیده فوتون‌ها در جسم سیاه ناخطی کر با استفاده از طیف جذبی آنها

فاطمه صائب و محمد اعتصامی

یزد، دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک

چکیده – ما با یک رهیافت مبتنی بر توابع همبستگی و معادله پارامتر نظم، در فرمول‌بندی ماتسوبارا روابطی برای بخش‌های حقیقی و موهومی طیف جذبی یک دستگاه بوزونی چگالیده*BCS* ای بدست آورده‌ایم. از طرف دیگر چنگ جفت‌شدگی و چگالش فوتون‌ها در یک جسم سیاه ناخطی کر و بعضی رفتارهای کوانتوم اپتیکی و ترمودینامیکی این دستگاه را بررسی کرده است. کارهای چنگ مبتنی بر قطری کردن هامیلتونی با استفاده از تبدیلات بوگولیوبو در تقریب میدان میانگین و برای دستگاهی دارای ابعاد و شکل معمولی بوده است. ما ضمن ارائه پیش‌بینی‌های خود در مورد طیف جذبی دستگاه چنگ به تجزیه و تحلیل اهم مباحث می‌پردازیم.

کلید واژه- حل خودسازگار، جسم سیاه ناخطی کر، چگالش فوتون‌ها، طیف جذبی

An Investigation of Condensation State of Photons in a Kerr Nonlinear Blackbody through Absorption Spectrum

Fatemeh Saeb, Mohammad Eatesami

Physics Department, Yazd University, Yazd 89195-741, Iran

Abstract- Based on correlation functions and order parameter equation and in the Matsubara formulation, we obtained expressions for the real and imaginary parts of the absorption spectrum of BCS condensation state of a boson system. On the other hand, Cheng investigated pairing and condensation state of photons in a Kerr nonlinear blackbody and studied some its quantum optics and thermodynamics behaviors. Cheng's works are based on diagonalization the Hamiltonian by the Bogoliubov transformation and are performed in the mean field approximation and for a system with ordinary shape and size. We present our predictions for the absorption spectrum of the Cheng's system and discuss the most important related problems.

Keywords: Self Consistence Solution, Kerr Nonlinear Blackbody, Photon Condensation, Absorption Spectrum

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱- مقدمه

یکی از جالب‌ترین چگاله‌هایی که به صورت نظری معرفی و رفتارهای چلانیده و همدوس‌شدگی، و ترمودینامیکی آن بررسی شده است، چگاله فوتون‌های تابش گرمایی در یک جسم سیاه ناخطی کر (KNB) بوده است [۱-۶]. در KNB به طور طبیعی نقش‌های همبستگی‌های بوزونی و وابستگی‌های جفت‌شدگی ترکیب شده [۷] و چگاله فوتونی با دمای گذاری قابل مقایسه با دمای ذوب الماس را ایجاد می‌کنند[۱]. این چگاله شبه BCS (باردین-کوپر-شریفر)ای در مقایسه با چگاله BEC (چگالش بوز-اینشتین) فوتونی، از نظر طبیعی بودن شرایط و دمای گذار خیلی بالاتر از دمای اتاق جالب‌تر به نظر می‌آید. مورد اخیر در میکروکاواک اپتیکی حاوی محلول ماده رنگینه و کوک‌شده با یک پرتو لیزری در دمای اتاق مشاهده شده [۸-۹] و به عنوان مهمترین نقطه عطف سال ۲۰۱۰ تاکنون در تاریخ چگالش‌ها و چگاله‌ها معروف گشته است. طبق نظریه چنگ [۳,۱] فوتون‌های تابش گرمایی در بلور ناخطی کر می‌توانند در زیر دمای گذار (T_c) با مبادله فونون‌های آکوستیکی به صورت جفت‌های مقیدی با بردارهای موج و چرخش‌های مخالف درآمده و یک چگاله ابرشاره را تشکیل دهند و فوتون‌های جفت-نشده به صورت نوعی از شبه ذره که نان‌پلاریتون نامیده شده درآیند. نان‌پلاریتون به صورت توده‌ای از فونون‌های ناقطبی مجازی (القایی) که حول یک فوتون به عنوان هسته متمرکز شده‌اند توصیف شده است. چنگ طی یک رشته پژوهش‌های ممتد با رهیافت‌های مختلف آماری، ترمودینامیکی، کوانتوم اپتیکی و... به توصیف و شناسایی چگاله فوتونی تشکیل شده در جسم سیاه ناخطی کر پرداخته است. به نظر می‌رسد که یکی از بهترین، کارآمدترین و دقیق‌ترین روش‌ها برای شناخت این چگاله و ویژگی‌های آن بررسی طیف جذبی آن می‌باشد که فرمول‌بندی برتر ما [۴] این امکان را فراهم آورده است.

۲- روابط بدست‌آورده شده

ما توابع همبستگی و معادله شاخص نظم را در یک دستگاه بوزونی چگالیده BCS ای با استفاده از فرمول‌بندی ماتسوبارا بدست آورده‌ایم[۱۰]، که معادله‌ای شناخته‌شده و دارای جواب خودسازگار عددی می‌باشد؛ و می‌تواند در کنار شواهد دیگر تائیدی بر چگالش BCS ای در یک دستگاه بوزونی باشد. بنظر می‌آید برای یک دستگاه چگالیده دربرگیرنده شبه ذرات با انرژی برانگیختگی پایین، بررسی طیف جذب تابش الکترومغناطیسی جالب باشد. با استفاده از فرمول‌بندی کوبو رابطه طیف جذب را برای این دستگاه بدست آورده-ایم[۷]. در فرآیند آن محاسبات روابطی برحسب دما داریم؛ در دستگاه KNB هم دماهایی بعضا بالا مطرح می-شود. اما حل تحلیلی مساله با فرض دماهای غیر صفر دارای پیچیدگی‌های فراوانی است، در ادامه کار دما را نزدیک صفر فرض کرده و حل را ادامه می‌دهیم. و امیدواریم بزودی با کمک روش‌های عددی طیف جذب چگاله KNB را در دماهای غیر صفر محاسبه کنیم.

اگر وابستگی شاخص نظم چگاله به اندازه حرکت بصورت $\Delta(\mathbf{p}) = \Delta\zeta_{\mathbf{p}}$ باشد، رابطه بخش حقیقی جذب بصورت زیر خواهد بود:

(۲)

$$\mathrm{Re}\,\sigma(\omega) = \frac{c'}{\omega\left(1-\Delta^2\right)} \int \rho(E)dE \int \rho(E')dE'\,\delta(\omega - E' + E)$$
$$\times\left[\frac{\Delta^2 EE' + E(\sqrt{1-\Delta^2}-1)(E'-(E+\omega)\sqrt{1-\Delta^2})}{4E\left(E+\omega\right)}\right.$$
$$\left.-\frac{\Delta^2 EE' + E'(\sqrt{1-\Delta^2}-1)(E+(\omega-E')\sqrt{1-\Delta^2})}{4E'\left(E'-\omega\right)}\right]$$
$$-\frac{c'}{\omega\left(1-\Delta^2\right)} \int \rho(E)dE \int \rho(E')dE'\,\delta(\omega - E' - E)$$
$$\times\frac{\Delta^2 EE' + E'(\sqrt{1-\Delta^2}-1)(E+(\omega-E')\sqrt{1-\Delta^2})}{4E'\left(E'-\omega\right)}$$

که در آن $\rho(E) = dN/dE = \rho_n/\sqrt{1-\Delta^2}$ و E چگالی حالت و انرژی نان پلاریتون‌ها (شبه ذرات) است. توابع دلتای دیراک نشان‌دهنده پایستگی انرژی حین فرآیند جذب و گسیل فوتون است. بعد از انجام محاسبات خواهیم داشت:

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

$$\mathrm{Re}\,\sigma(\omega)=\frac{c''}{4\left(1-\Delta^2\right)}\times \left(\frac{1}{\sqrt{1-\Delta^2}}-\frac{1}{1-\Delta^2}\right)\left(2\int\frac{dE}{\omega}-\int\frac{dE}{E}\right) \quad (۳)$$

c'' به مشخصات ذرات چگاله (جرم m ، چگالی ذرات n_0، چگالی حالت‌ها ρ_nو...) بستگی دارد و در هر دو حالت عادی و ابرشاره سیستم یکسان است. برای بررسی رفتار طیف جذبی می‌توانیم رابطه (۳) را به این ثابت بهنجار کنیم. با انتخاب محدوده تغییرات $0\le E\le\omega$ و انتگرال‌گیری، داریم:

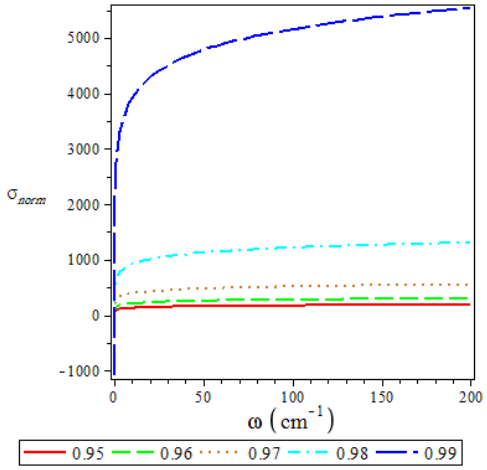
$$\sigma_{norm}=\frac{2-\ln\left(\frac{\omega}{\varepsilon\to 0}\right)}{4\left(1-\Delta^2\right)}\left(\frac{1}{\sqrt{1-\Delta^2}}-\frac{1}{1-\Delta^2}\right) \quad (۴)$$

بخش موهومی رابطه جذب تابش الکترومغناطیسی را هم می‌توان روابط کرامرز- کرونیگ و رابطه (۴) بدست آورد[۱۱].

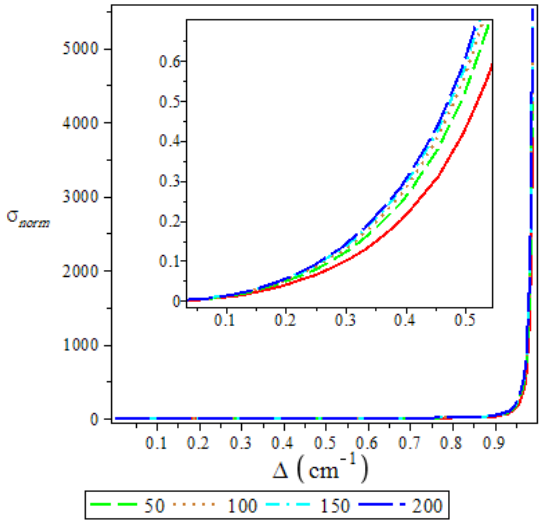
۳- طیف‌های جذبی، توصیف و تحلیل رفتارها

طیف جذب تابش الکترومغناطیسی که در رابطه (۴) بدست آمد، برای مقادیر مختلف پارامتر نظم چگاله فوتونی Δ در شکل۱آمده است. شکل۲ تغییرات جذب برحسب تغییرات پارامتر نظم برای مقادیر متفاوت بسامد فوتون-های تابشی نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ها دیده می‌شود طیف جذب دارای تکینگی است. جمله $\ln(\omega/0)$ تکینگی در نمودار ۱ را تولید می‌کند و عوامل تکینگی شکل۲ جملات $(1-\Delta)^{-1}$ و $(1-\Delta)^{-1/2}$هستند. برای اینکه بتوانیم طیف جذب را ترسیم کنیم، فرض کرده‌ایم: $\lim_{\varepsilon\to 0}\ln(\omega/\varepsilon)\to\ln(\omega/0.001)$. رفتار طیف جذبی مشابه رفتار یک سیاه چاله است که همه فوتون‌ها را به درون خود جذب می‌کند بنابراین برای همه مقادیر انرژی تابشی ω مقدار خیلی بزرگ است که با افزایش پارامتر نظم به سرعت بزرگتر می‌شود. رابطه (۴) را می‌توان به شکل دیگری در آورد:



شکل۱: طیف جذبی چگاله بوزونی BCSای برای مقادیر مختلف پارامتر نظم چگاله فوتونی Δ .



شکل۱: جذب تابش الکترو مغناطیسی چگاله بوزونی BCSای بر حسب تغییرات پارامتر نظم چگاله فوتونی برای مقادیر مختلف بسامد فوتون-های تابشی ω.

$$\sigma_{norm}=\underbrace{\left\{\frac{1}{2\left(1-\Delta^2\right)}\left(\frac{1}{\sqrt{1-\Delta^2}}-\frac{1}{1-\Delta^2}\right)\right\}}_{\text{Is negative (independent of }\omega)}+ \underbrace{\left\{\frac{-1}{4\left(1-\Delta^2\right)}\left(\frac{1}{\sqrt{1-\Delta^2}}-\frac{1}{1-\Delta^2}\right)\lim_{\varepsilon\to 0}\ln(\omega/\varepsilon)\right\}}_{\text{Is positive}} \quad (۵)$$

که جمله اول باعث می‌شود σ_{norm} در حد $\omega\to 0$ منفی شود که به معنی نداشتن جذب است و نشان می‌دهد این چگاله درطیف جذب فروسرخ عبور فرکانس پایین دارد. همچنین هیچ نشانی از وجود گاف در طیف برانگیختگی-

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

های بنیادی چگاله دیده نمی‌شود که این در توافق کامل با پیش‌بینی‌های نظری است [۱و۷].

پارامترنظم یکی از مشخصه‌های یک چگاله است که به متغیرها و شرایط آن وابسته است. همانطور که قبلا اشاره شد رابطه های (۱-۴) بطور دقیق فقط در دماهای پایین برقرار هستند. بنابراین در اینجا $\Delta \to \Delta(0)$ و لذا تغییرات Δ تنها به معنی مقایسه جذب در چگاله‌های مختلف است. طبق نتایج [۳,۱] Δ که در دمای صفر بیشینه مقدار خود را دارد با افزایش دما به طور همواری کاهش یافته و در دمای گذار صفر می‌شود به علاوه در یک دمای معین هر چه ضریب ناخطی کر γ بزرگتر باشد Δ، انرژی پایدارسازی u و عامل چلانیده‌گی r (همچنین T_c)کوچکتر خواهد بود. توجه داشته باشیم که $\gamma < 1$ ثابت بی بعدی است که مشخصه‌ای از بلور می‌باشد و شدت جفت‌شدگی بین یک نان‌پلاریتون و فونون‌های ناقطبی مجازی آن را مشخص می‌کند. در حد جفت‌شدگی ضعیف $\gamma \to 1$ توانایی یک نان‌پلاریتون برای جذب یا گسیل فونون‌های ناقطبی حقیقی بیشترین مقدار می‌باشد. بنابراین از نمودارهای ما که بیان‌گر افزایش جذب با افزایش Δ است نتیجه می‌شود که هرچه γ کوچکتر باشد (یعنی توانایی نان‌پلاریتون‌ها در جذب و گسیل بیشتر باشد) میزان جذب بیشتر خواهد بود. متعاقب این نتیجه‌گیری می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بیشتر بودن u، r و T_c امکان جذب بیشتر را به دنبال دارد که منطقی به نظر می‌آید و باید مورد بررسی دقیق‌تر قرار بگیرد. اهمیت این رفتارهای جذبی پیش بینی شده، با توجه به دستگاه مساله که بلور غیرخطی کر است، از جهت ذخیره سازی انرژی بسیار بالاست. انرژی خورشیدی تابش الکترومغناطیسی پاک ، ارزان و دردسترس است که بهره-گیری از آن به روش‌های مختلف در دستورکار محققان قرارگرفته است. امیدواریم با توجه به ظرفیت‌ها و اختیاراتی که در این فرمول‌بندی وجود دارد به دستگاه مطلوبی برای ذخیره‌سازی انرژی تایش خورشیدی برسیم.
عامل دیگری که بنظر می‌آید باید بیشتر به آن توجه کنیم شکل و اندازه دستگاه است چراکه چگالی حالت‌های فوتونی به آن وابسته است. برای دستگاه چنگ که دارای شکل مکعبی و ابعاد معمولی فرض شده است معادله Δ به صورت معادله ۶۲ مرجع [۱] ساده می‌شود. برای دستگاه-هایی به شکل مخزن فوتونی که پیشنهاد کرده‌ایم[۱۲] یا به کوچکی میکروکاواک اپتیکی [۸] معادله پارامتر نظم با توجه به رابطه زیر به چه صورت درمی‌آید؟

$$\mathbf{k} \to \int N(k)\mathrm{d}^3k \to \sum_{j_1\,q_1\,k_1}^{j_2\,q_2\,k_2} N(k)k^2\mathrm{d}k\sin q\,\mathrm{d}q\,\mathrm{d}j$$

معادله حاصل در چه شرایطی جواب دارد؟ پیش‌بینی می-شود که تغییر شکل و ابعاد دستگاه تاثیراتی روی چگاله و رفتارهای آن داشته باشد. ما در کار دیگر خود [۱۲] یک مخزن فوتونی را معرفی کرده‌ایم که پیکربندی از شبه میکروکاواک‌ها در آن تشکیل می‌گردد و به این ترتیب امکان وقوع چگالش برای فوتون‌های تابش گرمایی درون آن میسر می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

ما در این کار به معرفی و بررسی طیف جذب چگاله فوتونی به عنوان یکی از بهترین راه‌کارها برای شناسایی چگاله فوتونی در KNB و تکمیل کننده پژوهش‌های ممتد چنگ، پرداخته‌ایم.

مراجع

[1] Z. Cheng, J. Opt. Soc. Am. B 19, 1692 (2002).
[2] Z. Cheng, Phys. Rev. A 71, 033808 (2005).
[3] Z. Cheng, Phys. Rev. A 80, 033826 (2009).
[4] Cheng Z., J. Opt. Soc. Am. B **19**, 1692, (2002).
[5] Cheng Z., Phys. Lett. Vol **22**, No. 4 (2005).
[6] Cheng Z., Phys .Lett. Vol **25**, No. 9 (2008).
[7] F. Saeb, M. Eatesami, Submitted.
[8] J. Klaers, J. Schmitt, F. Vewinger and M. Weitz, Nature 468, 545 (2010).
[9] J. Klaers, J. Schmitt, T. Damm, F. Vewinger and M. Weitz, Appl Phys B 105, 17 (2011).
[۱۰] فاطمه صائب، محمد اعتصامی؛ کنفرانس سالانه فیزیک ایران؛ دانشگاه یزد؛ شهریور ۹۱.
[11] Handbook of High-Temperature Superconductivity, Springer Science + Business Media (2007)
[۱۲] فاطمه صائب، محمد اعتصامی؛ ارسال شده برای بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک؛ بهمن ۹۲؛ دانشگاه صنعتی شیراز.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]