



بررسی حالت چگالیده فوتون‌ها در جسم سیاه ناخطری 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 ناخطری 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 ناخطری 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

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 آورده‌ایم [۷]. در فرآیند آن محاسبات روابطی برحسب دما داریم؛ در دستگاه KNB هم دماهایی بعضًا بالا مطرح می‌شود. 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 بزوی با کمک روش‌های عددی طیف جذب چگاله KNB را در دماهای غیر صفر محاسبه کنیم.

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

(۲)

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

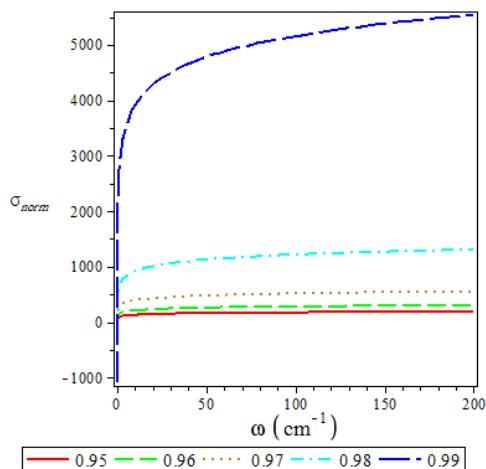
که در آن $E = dN/dE = \rho_n/\sqrt{1-\Delta^2}$ و $\rho(E) = dN/dE = \rho_n/\sqrt{1-\Delta^2}$ چگالی حالت و انرژی نان‌پلاریتون‌ها (شبه ذرات) است. توابع دلتای دیراک نشان‌دهنده پایستگی انرژی حین فرآیند جذب و گسیل فوتون است. بعد از انجام محاسبات خواهیم داشت:

۱- مقدمه

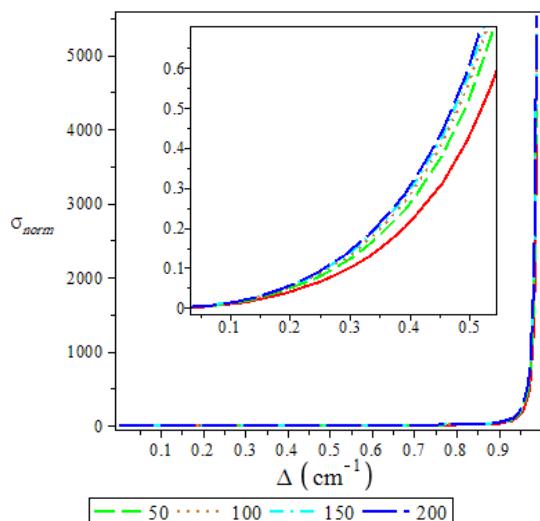
یکی از جالب‌ترین چگاله‌هایی که به صورت نظری معرفی و رفتارهای چگالیده و همدوس‌شدگی، و ترمودینامیکی آن بررسی شده است، چگاله فوتون‌های تابش گرمایی در یک جسم سیاه ناخاطی کر (KNB) بوده است [۱-۶]. در KNB به طور طبیعی نقش‌های همبستگی‌های بوزونی و وابستگی‌های جفت‌شدگی ترکیب شده [۷] و چگاله فوتونی با دمای گذاری 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 ناخاطی 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 مرکز شده‌اند توصیف شده است. چنگ طی یک رشته پژوهش‌های ممتد با رهیافت‌های مختلف آماری، ترمودینامیکی، کوانتم اپتیکی و... به توصیف و شناسایی چگاله فوتونی تشکیل شده در جسم سیاه ناخاطی 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 بدست آورده 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



شکل ۱: طیف جذبی چگاله بوزونی BCS ای برای مقادیر مختلف پارامتر نظم چگاله فotonی Δ .



شکل ۱: جذب تابش الکترومغناطیسی چگاله بوزونی BCS ای بر حسب تغییرات پارامتر نظم چگاله فotonی برای مقادیر مختلف بسامد فotonی‌های تابشی ω .

$$\sigma_{norm} = \begin{cases} \frac{1}{2(1-\Delta^2)} \left(\frac{1}{\sqrt{1-\Delta^2}} - \frac{1}{1-\Delta^2} \right) & \text{Is negative (independent of } \omega \text{)} \\ \frac{-1}{4(1-\Delta^2)} \left(\frac{1}{\sqrt{1-\Delta^2}} - \frac{1}{1-\Delta^2} \right) \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \ln(\omega/\varepsilon) & \text{Is positive} \end{cases} \quad (5)$$

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

$$\operatorname{Re} \sigma(\omega) = \frac{c''}{4(1-\Delta^2)} \times \left(\frac{1}{\sqrt{1-\Delta^2}} - \frac{1}{1-\Delta^2} \right) \left(2 \int \frac{dE}{\omega} - \int \frac{dE}{E} \right) \quad (3)$$

c'' به مشخصات ذرات چگاله (جرم m ، چگالی ذرات n_0 ، چگالی حالتها ρ ...) 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 بنهنجار کنیم. با انتخاب محدوده تغییرات ω و $0 \leq E \leq \omega$ انتگرال گیری، داریم:

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

با خش موهمی 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 فotonی Δ در شکل ۱ آمده است. شکل ۲ تغییرات جذب بر حسب تغییرات پارامتر نظم برای مقادیر مختلف بسامد فotonی‌های تابشی نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل‌ها دیده می‌شود طیف جذب دارای تکینگی است. جمله $\ln(\omega/0)$ تکینگی در نمودار ۱ را تولید می‌کند و عوامل تکینگی شکل ۲ جملات $(1-\Delta)^{-1/2}$ و $(1-\Delta)^{-1}$ هستند. برای اینکه بتوانیم طیف جذب را ترسیم کنیم، فرض کردہایم: $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \ln(\omega/\varepsilon) \rightarrow \ln(\omega/0.001)$. 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 آورده:

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؟

$$\int_{k_1}^{k_2} \int_{q_1}^{q_2} \int_{j_1}^{j_2} N(k) d^3 k = \int_{k_1}^{k_2} \int_{q_1}^{q_2} \int_{j_1}^{j_2} N(k) K^2 d k \sin q d q d j$$

معادله حاصل در چه شرایطی جواب دارد؟ پیش‌بینی می‌شود که تغییر شکل و ابعاد دستگاه تاثیراتی روی چگاله و رفتارهای آن داشته باشد. ما در کار دیگر خود [۱۲] بک 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 متند 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 اعتمادی؛ کنفرانس سالانه فیزیک ایران؛ دانشگاه یزد؛ شهریور ۹۱.
- [۱۱] Handbook of High-Temperature Superconductivity, Springer Science + Business Media (2007)
- [۱۲] فاطمه صائب، محمد اعتمادی؛ ارسال شده برای بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک؛ بهمن ۹۲؛ دانشگاه صنعتی شیراز.

های بنیادی چگاله دیده نمی‌شود که این در توافق کامل با پیش‌بینی‌های نظری است [۷و۱].

پارامتر نظم یکی از مشخصه‌های یک چگاله است که به متغیرها و شرایط آن وابسته است. همانطور که قبلاً اشاره شد رابطه‌های (۴-۱) بطور دقیق فقط در دماهای پایین برقرار هستند. بنابراین در اینجا (۰) Δ 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 ناخطي کر γ بزرگ‌تر باشد Δ ، انرژی پایدارسازی u و عامل چلانجیده‌گی r (همچنین T_c) کوچکتر خواهد بود. توجه داشته باشیم که $\gamma < 1$ ثابت بی بعدی است که مشخصه‌ای از بلور می‌باشد و شدت جفت‌شدنگی بین یک نان‌پلاریتون و فوتون‌های ناقطبی مجازی آن را مشخص می‌کند. در حد جفت‌شدنگی ضعیف $\gamma = 1$ 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 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 پیش‌بینی 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 در دسترس است که بهره‌گیری از آن به روش‌های مختلف در دستورکار محققان قرار گرفته 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-