This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

دانشگاه یزد

دانشکده فیزیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

فیزیک حالت جامد

بررسی نظری شاره فوتونی در میکروکاواک نوری از منظر چگالش بوز- اینشتین

استاد راهنما

دکتر محمد اعتصامی

استاد مشاور

دکتر محسن خواجه امینیان

پژوهش و نگارش

نجمه دشتی رحمت آبادی

اسفند ماه 1391

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

تقدیم به :

پدر که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی،

ایستادگی را تجربه نمایم

و به مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش

همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر

و به:

همسرم، اسطوره زندگیم، پناه خستگیم و امید بودنم

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

تقدیر و تشکر از

استاتید گرانقدر جناب آقای دکتر محمد اعتصامی و دکتر

محسن خواجه امینیان که با راهنمایی های خویش مرا در

انجام این پژوهش یاری داده اند و سایر اساتید ارجمندم که در

مکتب آنان نه تنها علم ودانش را بلکه درس عشق و ایمان و

سخاوت آموختم امیدکه بتوانم روزی سپاسگذارم زحمات بی

دریغشان باشم.

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

چکیده

چگالش بوز- اینشتین (BEC)، تجمع ماکروسکوپی ذرات اسپین درست (بوزون‌ها) در حالت پایه انرژی زیر دمای بحرانی T_{crit} است، که در چندین دستگاه فیزیکی از جمله گازهای اتمی فوق سرد رقیق مثل سدیم و شبه‌ذرات حالت جامد مشاهده شده است. تابش جسم سیاه تابشی که در ترازمندی گرمایی با دیواره‌های کاواک یک گاز بوزونی است که این گذار فاز را نشان نمی‌دهد. زیرا در این دستگاه، فوتون‌ها دارای پتانسیل شیمیایی ناچیزی هستند، بدین معنا که تعداد آن‌ها با تغییر دمای گاز فوتونی، ثابت باقی نمی‌ماند و در دماهای پایین به جای اشغال حالت پایه، جذب دیواره‌های کاواک می‌شوند. کلارز و همکارانش (2010) وقوع چگالش بوز -اینشتین فوتون‌ها، در یک میکروکاواک نوری حاوی رنگینه که مانند جعبه‌ای با دیوارهای سفید عمل می‌کند، را گزارش کرده‌اند. در کار تجربی مورد نظر، آینه‌های کاواک هم پتانسیل محصور کننده و هم جرم فوتونی مؤثر ناچیزی را ایجاد می‌کنند، به گونه‌ای که دستگاه برابر با گاز دو بعدی به تله افتاده از بوزون‌های جرم‌دار را تشکیل می‌دهد. فوتون‌ها به واسطه پراکندگی مکرر از مولکول های رنگینه به ترازمندی گرمایی با حلال رنگینه در دمای اتاق، می‌رسند. با افزایش چگالی فوتون BEC در دمای اتاق رخ می‌دهد.نتایج تجربی، با فیزیک آماری و مدل معادلات آهنگ توافق خوبی دارد، و خواص گاز فوتونی در ترازمندی گرمایی را توصیف می‌کند.

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

فهرست مطالب

فصل اول : چگالش بوز اینشتین

1-1 مقدمه 2
2-1 گاز بوز ایده‌آل تحت پتانسیل هماهنگ 3
1-2-1 دمای گذار 6
2-2-1 کسر چگاله 7
3-2-1 پتانسیل شیمیایی 7
4-2-1 گرمای ویژه 8
3-1 BEC در یک و دو بعد تحت پتانسیل سهمی‌وار 9
1-3-1 چگالی حالت‌ها 9
2-3-1 دمای گذار 10
3-3-1کسر چگاله 11
4-1تابع توزیع نیمه‌کلاسیکی 12
5-1 معادله گروس-پیتاوسکی 14
6-1 تقریب توماس فرمی 15

فصل دوم:مشاهده BEC فوتون‌ها در میکروکاواک حاوی محلول رنگینه

1-2 مقدمه 21
2-2 ترتیب آزمایش 23
3-2 طیف‌های گرمایی 25
4-2 توزیع فضایی و طیفی فوتون‌های گرمایی 26
1-4-2 توزیع مجدد فوتون‌ها 31
5-2 توزیع فضایی و طیفی فوتون‌ها چگالیده (چگالش بوز-اینشتین) 33
1-5-2 وابستگی توان بحرانی پمپ لیزری به هندسه کاواک 36
2-5-2 چگالش با واهلش فضایی 38

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

2-5-3 چرخه‌های بازجذب 39

2-5-4 خود تعاملی چگاله نور 41

فصل سوم:فیزیک آماری چگالش بوز-اینشتین فوتون‌ها

3-1 مقدمه 47

3-2 رابطه پاشندگی فوتون‌ها درون کاواک 47

3-3 ترازمندی گرمایی 49

3-4 رابطه استپانو-کنارد طیف رنگینه 49

3-5 ترازمندی شیمیایی بین فوتون‌ها و مولکول‌های رنگینه 51

3-7 نظری آماری گاز فوتون دو بعدی 52

3-8 معادلات آهنگ در میکروکاواک 54

3-8-1 معادله اصلی و جواب آن 58

3-8-2 محاسبه عددی p_n 59

3-8-2 توزیع‌های مجانبی تعداد فوتون‌ها 61

3-8-3 توزیع بوز-اینشتین 61

3-8-4 توزیع پواسون 62

3-8-5 در آمار فوتونی 63

3-9 تابع همبستگی مرتبه دوم و افت و خیزهای چگاله 67

فصل چهارم:الکترودینامیک چگالش بوز- اینشتین در میکروکاواک نوری

4-1 مقدمه 73

4-2 معادلات ماکسول در ماده 73

4-3 مسئله مقدار مرزی 74

4-4 مختصات کروی پخت 76

4-5 معادله هلمهولتز اسکالر در مختصات پخت 77

4-5-1 مدهای عرضی 78

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

4-5-2 مدهای طولی 80
4-6 جواب اسکالر 81
4-7 جواب برداری 81
4-8 مقدارهای مرزی و ویژه‌مقدارها 84
4-9 بردارهای قطبش 85
4-10 کوانتش میدان 89
4-11 هامیلتونی فوتون‌ها در میکروکاواک 91
4-12 N_{crit} برای گاز فوتونی بدون برهمکنش 94

فصل پنجم:ابرمتراکم‌ساز

5-1 مقدمه 99
5-2 تابش خورشیدی و ظرفیت‌های ممکن در ابرمتراکم‌سازی احتمالی آن 101
5-3 فیزیک آماری فوتون‌های تابش خورشیدی محصور شده چگالیده 104
منابع 111

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

فهرست اشکال

شکل 2-1:طرحواره ترتیب آزمایش، میکروکاواک با لیزری پمپاژ می‌شود..... 22

شکل2-2 : شدت نسبی جذب $\alpha(\lambda)/\alpha_{\max}$ و تابش $f(\lambda)/f_{\max}$ برای رنگینه‌های (الف) پریلین‌دی‌آمید و (ب) رودامین G6را نشان داده شده است 23

شکل2-3: طیف مدهای کاواک و ضریب جذب $\alpha(\nu)$ و تابندگی $f(\nu)$ رودامین..... 26

شکل 2-4 : توزیع طیفی تابش گسیل شده از میکروکاواک برای فاصله‌های مختلف بین آینه‌ها. 27

شکل2-5 : انتقال باریکه پمپاژ (مربع‌ها) برحسب عدد مد طولی q را نشان می‌دهد. خط پر مربوط به قانون لمبرت-بیر $I(q)/I_0=\exp(-\alpha(q-q_0)\lambda_0/2n_0)$ با پارامتر $q_0=4.68\pm0.17$ است. این اندازه‌گیری نشان می‌دهد که گره‌های مؤثر انتهایی تشدید نوری درون آینه‌ها قرار دارند. (برای رودامین 6G درون متانول، با غلظت $\rho\approx2\times10^{-2}\,mol/l$ و انحنای آینه‌ها ($R_1=R_2=1m$)..... 27

شکل2-6 : توزیع طیفی تابش گسیل شده از میکروکاواک در شرایطی که تعداد فوتونها خیلی کمتر از تعداد بحرانی است در دمای $T=300$ K و $T=365$ K (دایره‌ها)، این اندازگیری ها تطابق خوبی با توزیع بولتزمن انرژی فوتون‌ها (خطوط) دارد $R_1=R_2=1\,\mathrm{m},\ \rho\approx2\times10^{-2}\,\mathrm{mol/l}$ [5].
29.....

شکل2-7 : توزیع طیفی بهنجار شده تابش گسیل شده از میکروکاواک (دایره‌ها) برای 4 طول موج قطع مختلف $\{570,590,615,625\}$ nm λ_c را نشان می‌دهد. خطوط پر توزیع بولتزمن انرژی فوتون‌ها در دمای $T=300$ K است[5].....30

شکل2-8 : الف) تصویری از گاز فوتونی (تصویر حقیقی روی حسگر دوربینCCD رنگی) را نشان می‌دهد. فوتون‌های کم انرژی (زرد) از مجاور مرکز تله و فوتون‌های پر انرژی (سبز) از بیرون از تله گسیل شده‌اند. ب) توزیع فوتونی در امتداد محوری که از مرکز تله میگذرد (دایره‌ها) . تابع توزیع نظری (خط) بر پایه میانگینگیری گرمایی روی همه مدهای تشدیدکننده و متناظر با توزیع گوسی است $R_1=R_2=1\,\mathrm{m},\ \rho\approx2\times10^{-2}\,\mathrm{mol/l}$ [5].....31

شکل2-9 : فاصله بیشینه شدت تابش گسیل شده از مرکز تله $|x_{\max}|$ برحسب مکان نقطه برانگیختگی x_{exc}، در طول موج قطع $\lambda_c=620$ nm متناظر با بازجذب ضعیف، تشعشع دقیقاً نقطه پمپاژ را دنبال می‌کند (دایره‌ها)، و در طول موج قطع $\lambda_c=580$nm متناظر با بازجذب قوی، فوتون‌ها در مرکز تله متراکم می‌شوند و مشروط به آن که نقطه پمپاژ را از $60\,\mu$m از مرکز تله بیشتر جابه‌جا شود (مربع‌ها). (پریلین دی‌آمید محلول در استون، با غلظت $\rho=0.75\ g/l$،

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

$R_1 = R_2 = 1\ \mathrm{m}$ و $q = 7$)[5]. 32
شکل2-10: توزیع طیفی فوتون‌ها (دایره‌ها) و تغییرات آن در اثر افزایش توان وارد بر کاواک را نشان می‌دهد. توان‌های نوری به توان بحرانی تجربی $P_{c,\exp} = (1.55 \pm 0.60)\ \mathrm{W}$ بهنجار شده است. این متناظر با تعدد بحرانی فوتون‌ها یعنی $N_c = (6.3 \pm 2.4) \times 10^4$ است. (رودامین6G در متانول، $\rho = 1.5 \times 10^{-3}\ \mathrm{mol/l}$، $R_1 = R_2 = 1\mathrm{m}$, q=7 و مدت هر پالس $0.5\mu\mathrm{m}$). نمودار بالایی طیف نظری بر مبنای توزیع بوز-اینشتین برانگیختگی‌های عرضی را نشان می‌دهد[5]. 33
شکل2-12: الف پایینی، توان درونی کاواک در نقطه بحرانی بر حسب عدد مدهای طولی نشان داده شده است. شکل بالایی توان پمپ نوری مورد نیاز را نشان می‌دهد که از رابطه $P_{pump} \propto (q - q_0)^{-1}$ با $q_0 = 4.77 \pm 0.25$ تبعیت می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم، توان، رابطه معکوسی با طول جذب در $(q - q_0)$دارد که q_0 عمق نفوذ مؤثر در آینه کاواک است.ب توان درون کاواک در نقطه بحرانی و برای انحناهای مؤثر آینه کاواک.[5]. 37
شکل2-13: توزیع شدت فوتون‌ها در طول محور متقاطع مرکز تله برای طول موج‌های قطع متفاوت رسم شده است. برای طول موج قطع 610 nm بازجذب ضعیف است. هنگامی که به سمت طول موج‌های قطع کمتر می‌رویم، جذب افزایش می‌یابد و توزیع نور به سمت مرکز تله متمایل می‌شود. داده‌های ثبت شده برای طول موج قطع 570 nm، به‌صورت قله‌ای مطابق با حالت چگالهای با سهم چگالش 1% N_0/N ظاهر می‌شود[5]. 38

شکل 3-1 : رابطه پاشندگی فوتون‌ها در کاواک (خطوط پر) با عدد مد طولی ثابت ($q = 7$)، و پاشندگی فوتون‌های آزاد (نقطه‌چین) را نمایش می‌دهد[3]. 48

شکل 3-2 : نمودار جابلونسکی مولکول رنگینه شامل دو تراز الکترونی به فاصله $\hbar\omega_0 = 1.41\ \mathrm{eV}$، یک مجموعه از ترازهای ارتعاشی- چرخشی با فواصل میلی‌الکترون‌ولتی در بالا و پایین S_0, S_1 وجود دارد[7]. 49
شکل3-3 : در شکل کسر چگالهٔ $\bar{n}_0/\bar{N}$ و کسر برانگیختگی فوتون‌ها $\bar{n}_0/X$ برحسب دمای کاهش یافته T/T_C، برای $\bar{N} = 10^4$ فوتونها، به ازای شش تعداد ملوکول‌های رنگینه متناظر با $M_1 = 10^8$، $M_2 = 10^9$ تا $M_6 = 10^{13}$ و نامیزانی کاواک-رنگینه $\hbar\Delta/k_B T_C = -4.35$ نشان داده شده است[6]. 60.
شکل3-5 : افت و خیزهای بهنجار شده چگالهٔ $g^{(2)}(0) = \langle n_0(n_0 - 1)\rangle / \bar{n}_0^2$ برحسب T/T_c برای منبع ذخیره‌های مختلف، زیر دمای بحرانی T_c نشان داده شده است[6]. 69
شکل4-1 : هندسه میکروکاواک از دو سر برآمده را نشان می‌دهد. این دستگاه تحت چرخش حول محورz ثابت است. زاویه قطبی θ نشان داده شده هیچ نقشی در مختصات استوانه‌ای ندارد، اما به

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

مختصات خطوط منحنی که صفحات آینه‌ها را توصیف می‌کنند مربوط است (خطوط مشکی پررنگ). R شعاع انحنای آینه‌ها و L فاصله بین دو آینه است[8]. 75

شکل 4-2 :الف) سطوح مختصات در μ ثابت بیضی‌ها هستند. نصف محور کوچکتر با μ و دو کانون با a تعریف می‌شوند. ب) مختصات کروی پخت. یک برش از صفحه xz برای $\phi = 0$ نشان داده شده است.[8]. 76

شکل (4-3) الف) طرحی برای انحراف برداری مربوط به بردار یکه متغییرn، و ب) میدان برداری $\mathbf{A}_{00}^{n}$ در $z = 0.25L$ [8]..... 86

4-5: الف) نمودار شدت حالت پایه در جهت شعاعی برای $z = 0.25L$. ب) نمودار پربندی شدت برای حالت پایه در صفحه xy برای $z = 0.25L$ [8]. 88

4-5: الف) نمودار شدت حالت پایه در جهت شعاعی برای $z = 0.25L$. ب) نمودار شدت برای حالت پایه در صفحه xy برای $z = 0.25L$ [8]. 89

شکل 5-1: ابرمتراکم‌ساز تابش خورشیدی 101

شکل5-2: برخورد یک زوج فوتون و جفت‌شدگی با $\mathbf{K} = \mathbf{0}$ [29]..... 104

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

فصل اول

چگالش بوز-اینشتین

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

1-1 مقدمه

برخلاف گاز ایده‌آل کلاسیک یا گاز ایده‌آل فرمی- دیراک، گاز بوز- اینشتین یک‌گذار فاز ترمودینامیکی از خود نشان می‌دهد که به چگالش بوز- اینشتین (BEC) موسوم است .یلن گذار فاز برای ذرات بدون برهمکنش اتفاق می‌افتدو ناشی از آمار ذرات است نه برهمکنش بین آن‌ها . در این گذار فاز، تمام مشاهده‌پذیرهای ترمودینامیکی دچار تغییر ناگهانی در رفتار خودمی‌شوند . در این‌جا کلمه «چگالش» فقط از روی مشابهت صوری با گذار فلزین گاز و مایع معمولی به کار می‌روبا سرد کردن گازهای نادر در اثر نیروی واندروالس بین اتم‌ها، گاز به صورت چگالیده درآمده، به‌طوریکه قطرات مایع-بخار اشباع شده تشکیل می‌شود. به همین طریق، پایین‌تر از دمای بحرانی T_c در چگالش بوز-اینشتین، ذرات «گاز نرمال» در حال تعادل با ذرات «چگالیده» قرار دارند. اما برخلاف قطرات مایع درون یک گاز، در این‌جا ذرات «چگالیده» در فضای حقیقی از ذرات نرمال جدا نشده‌اند، بلکه در فضای تکانه از یکدیگر جدا هستندذرات چگالیده همگی یک حالت تک‌ذره‌ای با تکانه صفر را اشغال می‌کنند، در حالی‌که ذرات نرمال همگی دارای تکانه متناهی هستند. چگالش بوز-اینشتین در ابتدا برای فوتون‌های درون جسم‌سیاه غیر خطی ارائه شد، اما چگالش را نمی‌توان برای دستگاه سه بعدی جرم‌دار و یا هلیوم 4 بکار برد، زیرا در دماهای پایین برهمکنش قوی بین ذرات به‌وجود می‌آید در حالی‌که در چگالش مطرح شده توسط بوز -اینشتین برهمکنش، در نظرگرفته نشده است. در مورد هلیوم 4 از آن‌جایی‌که برهمکنش‌ها قوی هستند و نمی‌توان از آن‌ها صرف‌نظر کرد، بوگولیوبوف معادلاتی را بکار برد که موفقیت چندانی نداشت زیرا معادلات بوگولیوبوف در مورد برهمکنش‌های ضعیف صادق استدر نتیجه معادلات خودسازگار گروس-پیتاوسکی در مورد هلیوم 4 به‌کار برده شد. در این فصل به معرفی برخی مشاهده‌پذیرهایی که در نتیجه چگالش بوز- اینشتین دچار تغییر می‌شوند می‌پردازیم[1,2].

2-1 گاز بوز ایده‌آل تحت پتانسیل هماهنگ

هامیلتونی دستگاهی با N ذره بدون برهمکنش به جرم M تحت‌پتانسیل هماهنگ به‌صورت زیر است

This PDF is Created by Simpo Word to PDF unregistered version - http://www.simpopdf.com

$$H=\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{2M}\left(p_{xi}^2+p_{yi}^2+p_{zi}^2\right)+\sum_{i=1}^{N}\frac{M}{2}\left(\omega_x^2x_i^{\,2}+\omega_y^2y_i^{\,2}+\omega_z^2z_i^{\,2}\right), \tag{1-1}$$

با توجه به تبدیلات کانونی

$$\left[x_i,p_{xj}\right]=\left[y_i,p_{yj}\right]=\left[z_i,p_{zj}\right]=i\hbar\delta_{ij}, \tag{2-1}$$

طیف انرژی دستگاه با رابطه زیر داده می‌شود

$$E_{n_x,n_y,n_z}=\hbar\left(\omega_x n_x+\omega_y n_y+\omega_z n_z\right)+E_{0,0,0}, \tag{3-1}$$

که در آن $n_{x,y,z}=0,1,2,...$ و $E_{0,0,0}$ پایین‌ترین حالت انرژی است

$$E_{0,0,0}=\frac{\hbar}{2}\left(\omega_x+\omega_y+\omega_z\right), \tag{4-1}$$

در ترازمندی گرمایی، توزیع بوزون‌ها روی ترازانرژی رابطه (3-1)بصورت توزیع بوز - اینشتین زیر است

$$N_{n_x,n_y,n_z}=\frac{1}{\exp\left[\beta\left(E_{n_x,n_y,n_z}-\mu\right)\right]-1},$$

$\beta\equiv1/k_BT$ و μ پتانسیل شیمیایی است. تعداد متوسط کل ذرات برابر است با N

$$N=\sum_{n_x,n_y,n_z=0}^{\infty}\frac{1}{\exp\left[\beta\left(E_{n_x,n_y,n_z}-\mu\right)\right]-1}, \tag{5-1}$$

هنگامی که k_BT بیش‌تر از فاصله بین‌ترازهای‌انرژی باشد، در رابطه (5-1)سیگما با انتگرال جایگزین می‌شود.

$$\sum_{n_x,n_y,n_z}\ldots\ \rightarrow N_0+\int_0^{\infty}dE\ D(E)\ \ldots\ , \tag{6-1}$$

که $D(E)$ چگالی حالت‌ها و N_0 تعداد بوزون‌ها در پایین‌ترین حالت انرژی است .چون این تعداد زیر دمای گذار چگالش بلوتشتین، با نزدیک شدن پتانسیل شیمیایی μ به $E_{0,0,0}$ ماکروسکوپی می‌شود، جدا نوشته شده است.

$$N_0=\frac{1}{\exp\left[\beta\left(E_{0,0,0}-\mu\right)\right]-1}, \tag{7-1}$$

$D(E)\hbar\omega$،تعداد نقاط شبکه $\left(n_x,n_y,n_z\right)$ را مشخص می‌کند که دراین بازه انرژی $E-\hbar\omega<\hbar\left(\omega_x n_x+\omega_y n_y+\omega_z n_z\right)\le E$ قرار دارند. فرض می‌کنیم که پتانسیل همسانگرد $\omega=\omega_x=\omega_y=\omega_z$ است، و بیشینه تعداد n، از $E/\hbar\omega$ تجاوز نمی‌کند. در این صورت $D(E)\hbar\omega$، تعداد نقاط شبکه $\left(n_x,n_y,n_z\right)$ که رابطه زیر را برآورده می‌کنند، مشخص می‌نماید.