بسم الله الرحمن الرحيم

١٠٧٩٥٨

۸۷/۱/۱۰۲۲۵۰
۸۷/۱۰/۲۸

دانشگاه شهید بهشتی
دانشکده علوم — گروه فیزیک

رساله ارائه شده برای دریافت درجه دکترای فیزیک
(گرایش ماده چگال نظری)

عنوان :

اکسیتون‌ها و فرمیونی شدن آنها در نانولوله های چاه‌های کوانتمی نیمه‌رسانای نوع—II

۱۳۸۷/۱۰/۱ -۵

نگارش :
مهران باقری

استاد راهنما :
دکتر فرشاد ابراهیمی
استاد مشاور :
دکتر ماهیار نوشیروانی

شهریور ماه ۱۳۸۷

۱۰۷۹۵۸

تاریخ .....
شماره .....
پیوست.....

بسمه تعالی

دانشگاه شهید بهشتی

« صورتجلسه دفاع از رساله دکترا »

****

جلسه ارزیابی رساله آقای مهران باقری فرزند غلامعلی دارای شناسنامه شماره ۱۰۳صادره از خمین متولد ۱۳۵۴دانشجوی دوره دکترای رشته فیزیک باعنوان:

تهران ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳ اوین
تلفن: ۲۹۹۰۱

اکسیتونها و فرمیونی شدن آنها در نانو لوله های چاههای کوانتمی نیمه رسانای نوع-II

****

به راهنمایی آقای دکترفرشاد ابراهیمی طبق دعوت قبلی درتاریخ ۱۳۸۷/۶/۲۵ تشکیل گردید وبراساس رای هیات داوران وباعنایت به ماده ۲۱، ۲۳،۲۲، تبصره های مربوطه مندرج درآیین نامه دوره دکترای مورخ ۱۳۷۲/۱۲/۸، رساله مزبور با نمره ...۱۹..... ودرجه .عالی.....مورد تصویب قرارگرفت .

اعضای هیات داوران :

	نام ونام خانوادگی	درجه دانشگاهی	امضاء
۱-استاد راهنما :	آقای دکتر فرشاد ابراهیمی	استادیار	
۲-استاد مشاور:	آقای دکتر ماهیار نوشیروانی	استادیار	
۳-داورداخل دانشگاه:	آقای دکتر محمد مهدی طهرانچی	استاد	
۴-داورخارج از دانشگاه:	آقای دکترناصر نفری	استاد	
۵-داورخارج ازدانشگاه:	آقای دکتر رضا عسگری	استاد	
۶-داور داخلی و نماینده تحصیلات تکمیلی:	خانم دکتر ترانه وظیفه شناس	استادیار	

۱۳۸۷/۱۰/۵

ناظر تحصیلات تکمیلی

قدردانی

سپاس بیکران ایزد منان را که توفیق گام نهادن در مسیر علم و دانش نصیبم فرمود تا بتوانم در سایه الطافش از بوستان دانش گلی برچینم و دلم را با نور معرفت جلا بخشم. در این راه از رهنمودهای عالمانه استاد فرزانه جناب آقای دکتر فرشاد ابراهیمی که راهنمایی این رساله را بر عهده داشتند بسیار بهره‌مند شده‌ام، از این رو بر خود واجب می‌دانم کمال تشکر و امتنان خویش را از محضر ایشان ابراز نمایم. از جناب آقای دکتر ماهیار نوشیروانی که با نظرات ارزشمندشان در مشاوره مرا بهره‌مند ساختند نیز قدردانی می‌کنم.

همچنین از اساتید بزرگوار گروه فیزیک دانشگاه شهید بهشتی که در طول مدت تحصیل در دوره لیسانس و دکترا افتخار شاگردی ایشان را داشتم، سپاسگزارم. بر خود واجب می‌دانم مراتب سپاس و قدردانی خویش را نسبت به اساتید مرکز تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان به ویژه جناب آقای دکتر محمدرضا کلاه‌چی که در طول مدت تحصیل در دوره فوق لیسانس از محضر ایشان کسب فیض نمودم، ابراز دارم.

از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر ناصر نفری که با حوصله و دقت پیش نویس رساله را مطالعه نموده و با اصلاحات دقیق و با ارزش بر کیفیت نگارش آن افزودند، سپاسگزارم.

ازخانواده مهربانم بویژه پدر و مادر عزیزم که در تمامی طول مدت تحصیل مشوق دائمی من بودند و صبورانه سختیها را تحمل کردند و برادرم مهندس محمد رضا باقری و خواهرم اعظم با خانواده‌های محترم ایشان که دوری از خانواده را بر من آسان کردند نهایت قدردانی را ابراز می دارم. در پایان از همه دوستان دوره‌های مختلف تحصیلی، بویژه آقای رضا معظمی بخاطر کمک در استفاده از فارسی تِک، و تمامی عزیزانی که در واحدهای مختلف آموزشی، پژوهشی و اداری دانشگاه شهید بهشتی کمال مساعدت و همکاری را با اینجانب داشتند تشکر می‌نمایم.

مهران باقری

شهریور ماه ۸۷

گلبرگ فروافتاده
آیا به شاخه‌اش باز می تواند جست؟
نه، پروانه‌ای بود آن.
تقدیم به پدر و مادر عزیزم که با شکیبایی و تحمل مشکلات این مهم را بر من آسان کردند.

چکیده

در این رساله با معرفی یک مدل شبه یک بعدی گاز بوزونی از اکسیتون‌های غیر مستقیم در نانولوله‌های نیمه رسانای چاه‌های کوانتمی نوع—II، به بررسی خواص همدوسی این گاز برهم‌کنشی در این ساختار می‌پردازیم. ابتدا طیف اکسیتون منفرد را در هندسه استوانه‌ای به دست می آوریم، سپس برهمکنش اکسیتون—اکسیتون را در حالت پایه محاسبه کرده و نشان می‌دهیم که اکسیتون‌ها تشکیل یک گاز یک بعدی بوزونی با برهمکنش رانشی می‌دهند. در نهایت با نگاشت این گاز بوزونی یک بعدی به مدل گاز بوزونی یک بعدی دقیقاً حل پذیر در دماهای پایین و در رژیم چگالی‌های پایین که خواص بوزونی گاز اکسیتونی برجسته هستند نشان می‌دهیم که اکسیتون‌ها در بازه برهمکنش قوی قرار دارند و فرآیند فرمیونی شدن آنها اتفاق می‌افتد.

واژه‌های کلیدی: گاز بوزونی یک بعدی، نانولوله‌های نیمه رسانای دوجداره، چگالش بوز—انیشتن اکسیتونی، فرمیونی شدن اکسیتون‌ها

فهرست مندرجات

۱ مقدمه ۷

۲ اکسیتون‌ها: بوزون‌های ترکیبی ۱۲

۲—۱ مقدمه ۱۲

۲—۲ اکسیتون چیست؟ ۱۳

۲—۳ گذارهای فاز اکسیتون‌ها ۱۴

۲—۴ همدوسی بلند برد اکسیتونی: شواهد آزمایشگاهی ۱۶

۲—۵ اکسیتون‌ها در چاه‌های کوانتمی ۱۷

۳ همدوسی کوانتومی ماکروسکوپیک: چگالشِ بوز—انیشتن در گاز ایده‌ال بوزونی ۱۹

۳—۱ مقدمه ۱۹

۳—۲ چگالشِ بوز—انیشتن چیست؟ ۲۰

۳—۳ گازهای اتمی تبهگن ۲۱

۳—۴ چگالشِ گاز بوزونی غیر برهم‌کنشی ۲۵

۳—۴—۱ گاز ایده‌ال همگن در سه بعد ۲۸

۳—۴—۲ گاز ایده‌ال ناهمگن در سه بعد ۲۹

۳—۴—۳ گاز بوزونی ایده‌ال در ابعاد پایین ۳۰

۳–۴–۴ گاز ایده‌ال همگن در دو و یک بعد ۳۰
۳–۴–۵ گاز ایده‌ال ناهمگن در دو و یک بعد ۳۱

۴ گاز بوزونی برهم‌کنشی ۳۳

۴–۱ مقدمه ۳۳

۴–۲ هامیلتونی بس ذرّه‌ای ۳۵

۴–۳ تقریب بوگولیوبف ۳۷

۴–۴ معادله گروس–پیتایوسکی ۴۰

۴–۵ هامیلتونی درجه دوم ۴۱
۴–۵–۱ تبدیل شبه ذرّه بوگولیوبف ۴۱
۴–۵–۲ معادلات جفت بوگولیوبف–دو ژِنس ۴۲
۴–۵–۳ طیف برانگیختگی ۴۳

۴–۶ تصحیحات مرتبه بالاتر ۴۳

۴–۷ برهم‌کنش‌ها در یک چگالیده ۴۳
۴–۷–۱ پتانسیل برهمکنش عریان ۴۴
۴–۷–۲ ماتریس–T دو ذرّه‌ای ۴۴
۴–۷–۳ ماتریس–T بس ذره ای ۴۵

۵ اکسیتون‌های غیرمستقیم در نانولوله‌های الکترون–حفره دو جداره ۴۶

۵–۱ اکسیتون منفرد ۴۶
۵–۱–۱ تکانه زاویه‌ای کل صفر($L=0$) ۵۳
۵–۱–۲ حالت تکانه زاویه‌ای کل ۱ :$L=1$ $l'_2=-l'_1+1$ ۵۵
۵–۱–۳ حالت تکانه زاویه‌ای کل ۱– :$L=-1$ $l'_2=-l'_1-1$ ۵۷

۵–۲ گاز اکسیتونی برهم‌کنشی ۶۳

۵–۳ برهمکنش اکسیتون–اکسیتون در دماهای پایین ۶۹

۵–۴ پراکندگی اکسیتون–اکسیتون ۷۲

۵–۵ روش شبه–پتانسیل: جواب های دقیق گاز بوزونی $1D$ با تابع پتانسیل دلتایی . . ۷۴
۵–۵–۱ مدل تونکس–گیراردو(TG) ۷۴
۵–۵–۲ مدل لیب–لینیگر(LL) ۷۵
۵–۵–۳ مدل یانگ–یانگ(YY) ۷۵
۵–۵–۴ نتیجه گیری ۷۷

۶ پیوست‌ها ۷۸

A چگالی حالات در یک پتانسیل هارمونیک D–بعدی ۷۹

B معادلهٔ گروس–پیتایوسکی ۸۱

B–۱ نمایش کوانتش اول ۸۱

B–۲ نمایش کوانتش دوم ۸۳

C هامیلتونی هارتری–فوک–بوگولیوبف ۸۴

D تقریب هامیلتونی کوانتش دوم برای حالت پایه ۸۷

E بسط چند قطبی پتانسیل برهمکنش اکسیتون–اکسیتون ۸۹

F پراکندگی از پتانسیل دلتایی ۹۱

لیست اشکال

۲—۱ نمودار فاز سیستم الکترون—حفره. ۱۵

۲—۲ چاه کوانتمی یگانه نوع—I (سمت چپ) و نوع—II (سمت راست). . . . ۱۸

۳—۱ λ_{dB} طول موج دوبروی ذره کوانتمی است. در یک دمای بحرانی و یک چگالی بحرانی فاصله متوسط بین ذرات قابل مقایسه با طول موج دوبروی است. با کاهش دما تمام ذرات یک تابع موج پیدا می‌کنند. ۲۳

۳—۲ مراحل تکامل تابع موج ابرذره (چگالیده). ۲۴

۵—۱ سطح مقطع نانولوله نیمه رسانای دو جداره $GaAs/AlAs$. تیوب داخلی به شعاع ρ_h با حفره‌ها (دایره کم رنگ) بار مثبت دارد در حالیکه تیوب برونی به شعاع ρ_e با الکترون‌ها (دایره‌های توپر) بار منفی دارند. برای محاسبات عددی فاصله جدایی دو لایه را $d = |\rho_h - \rho_e| \approx ۳۶$ Å با $\rho_h \approx ۶۰۰$ Å در نظر گرفته‌ایم. ۴۷

۵—۲ نمودار تابع $V^m_{l_۱,l_۲}$ بر حسب z_{rel} برای حالت $L = ۰$ و اندیس‌های کانال متفاوت. برای حالت $L = l_۱ + l_۲ = ۰$ چهار مولفه مستقل $V^۰_{-۱,۱} = V^۰_{۱,-۱}$، $V^۰_{۰,۰}$، $V^{-۱}_{۰,۰} = V^{-۱}_{۱,-۱}$، $V^{۱}_{-۱,۱} = V^{۱}_{۰,۰}$ و $V^{-۲}_{-۱,۱} = V^{۲}_{۱,-۱}$ را داریم. همچنین تابع Q_m برای $z_{rel} \to \infty$ بسمت صفر می‌رود. ۵۹

۵—۳ طرحواره چهار تراز اوّل انرژی، $\mathcal{E}^n_l$، یک اکسیتون منفرد. ۶۰

۵—۴ تغییرات انرژی حالت پایه $\mathcal{E}_0^\circ$ اکسیتون منفرد بر حسب فاصله جدایی دو تیوب، d. ۶۱

۵—۵ پنج مولفه اول (a) و پنج مولفه آخر (b) تابع موج بر حسب فاصله نسبی الکترون—حفره در راستای z_{rel}. ۶۲

۵—۶ گسترش تابع احتمال اکسیتون در راستای z_{rel}. ۶۲

۵—۷ تابع پتانسیل اکسیتون—اکسیتون برای سه مقدار متفاوت از فاصله جدایی الکترون—حفره. ۷۱

۵—۸ نمودار فاز گاز بوزونی همگن یک بعدی در صفحه $\gamma - \tau$. ناحیه هاشور خورده زیر فضایی است که گاز اکسیتونی مدل ما در آن قرار می‌گیرد. ۷۶

لیست جداول

۲—۱ مقایسه مشخصات بوزون‌های اتمی و غیراتمی در فرایند چگالش ۱۶

فصل ۱

مقدمه

سیالات کوانتمی تبهگن و همدوس بوزونی و فرمیونی امروزه برای بررسی پدیده‌های همدوسی در مقیاس ماکروسکوپیک توجه بسیاری از محققان حوزه‌های مختلف فیزیک را به خود جلب کرده‌اند. پدیده‌ها و تکنیک‌های آزمایشگاهی وابسته به سیالات کوانتمی همدوس در بازه زمانی ۲۰۰۸—۱۹۹۵، سه جایزه نوبل را به خود اختصاص داده‌اند: اولی در سال ۱۹۹۷ برای دستیابی به دماهای فوق سرد با استفاده از فرایند سرمایش لیزری [۱]، دوّمی در سال ۲۰۰۱ برای چگالشِ بوز—انیشتن اتمی و سوّمی در سال ۲۰۰۳ برای ابررسانایی و ابرشارگی [۱، ۲، ۳، ۴، ۵]. پس از اولین مشاهده آزمایشگاهی چگالشِ بوز—انیشتنِ اتمی در سال ۱۹۹۵، بررسی مایع‌های کوانتومی بوزونی هم در فیزیک اتمی و هم فیزیک ماده چگال با اقبال فراوانی روبرو شده است. در آزمایشی که در گروه کرنل [۲] در دانشگاه کلرادو انجام گرفت اتم‌های روبیدیم، ^{۸۷}Rb، در دمای فوق‌العاده پایین ($۱۷۰nK$) در یک حالت کوانتمی تک ذرّه‌ای چگالیده شدند. موفقیت اولین آزمایش باعث شد که دیگر گروه‌های تحقیقی درگیر در این مقوله کار را برای دیگر کاندیدهای اتمی پیگیری کنند. خیلی زود گروه کترلی [۳] در MIT چگالش را برای اتم‌های ^{۲۳}Na گزارش دادند. بلافاصله گروه هولت [۴] در دانشگاه رایس این کار را برروی اتم‌های ^{۷}Li تکرار کردند. هر سه آزمایش فوق در یک سال و به توالی انجام گرفتند که پیامد آن جایزه نوبل سال ۲۰۰۱ برای آنها بود. البته همه این آزمایش‌ها به مدد تکنیک دستیابی به دماهای ابر سرد با استفاده از فرایند سرمایش لیزری صورت گرفت. در سال‌های بعد آزمایش‌هایی بر روی دیگر بوزون‌ها ادامه پیدا کرد. خصیصه مشترک بیشتر این آزمایش‌ها اینست که گاز بوزونی را توسط پتانسیل‌های مگنتو—اپتیکی همسانگرد و یا ناهمسانگرد بدام [۵] می‌اندازند به طوری که فرکانس گیراندازی می‌تواند در هر یک از سه جهت فضایی متفاوت

---

[۱] laser cooling
[۲] Cornell
[۳] Ketterle
[۴] Hulet
[۵] trap

باشد. بالاخص، در آزمایش‌های اخیر تمرکز بیشتری برای خلق مایع‌های بوزونی کم بعد (یک و دو بعد) وجود دارد، این بدان دلیل است که تابع چگالی تک ذرّه‌ای و بس ذرّه‌ای سیستم‌های کم بعد متفاوت از حالت سه بعدی بوده و آثار همبستگی در ابعاد پایین قوی می‌باشند به طوری که نتایج با مشابه‌های سه بعدی آنها تفاوت‌های بنیادی دارد[۸۰، ٦٦، ٦، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱].

سیستم‌های اکسیتونی از کاندیدهای مورد نظر فیزیکدان‌های ماده چگال برای بررسی پدیده‌های دسته‌جمعی همدوس [٦] می‌باشند. در رژیم چگالی‌های اکسیتونی پایین، اکسیتون‌ها در نیمه رساناها از آمار بوزونی پیروی می‌کنند بنابراین انتظار می‌رود که آنها بعلت جرم سبکشان در مقایسه با جرم اتم‌های گازی گذار فازی به حالت چگالشِ بوز—انیشتن [۷](BEC) در دماهایی به مراتب بالاتر از دمای گذار حالت‌های اتمی از خود نشان دهند. اما در ابعاد پایین و در رژیم چگالی‌های پایین، انتظار می‌رود که فازهای دیگر ترمودینامیکی همچون فرمیونی شدن بوزون‌ها محتمل باشد. بعلاوه، امروزه به مدد پیشرفت‌های چشم‌گیری که در تکنولوژی ساخت نیمه رساناهای با هندسه های متفاوت در ابعاد پایین بوجود آمده است، فیزیکدان‌های ماده چگال با اشتیاق فراوانی به بررسی پدیده‌های همدوس در چنین ساختارهایی می‌پردازند. این بدان دلیل است که اثرهای اکسیتونی در چگالی‌های پایین، دماهای پایین و ابعاد پایین (در مقایسه با حالت سه بعدی) بسیار چشم‌گیرند و نادیده گرفتن آنها به عدم توافق بین نتایج نظری و تجربی منجر می‌شود. گزارش شواهد آزمایشگاهی BEC اکسیتون—پلاریتون در آوریل سال ۲۰۰٦ امیدهای جدیدی را برای بررسی آثار همدوسی بس ذرّه‌ای در سیستم‌های بوزونی حالت جامد مثل اکسیتون‌ها و مگنون‌ها بوجود آورد به طوری که در مه سال ۲۰۰٦ نیز چگالشِ مگنونی گزارش شد،[۲۳، ۲۲، ۲۱، ۱۷، ۱٦، ۱۵، ۱۴، ۱۳، ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۹، ۸، ۷] [۴۳، ۴۲، ۳۸، ۳۷، ۳۴، ۳۳، ۳۲، ۳۱، ۳۰، ۲۹، ۲۸، ۲۷، ۲٦، ۲۵، ۲۴].

بعلاوه، مطالعات نظری و تجربی پدیده‌های کوانتمی ماکروسکوپیک از جمله چگالش در سایر سیستم‌های بوزونی از جمله اکسیتون‌ها [۸]، اکسیتون—پلاریتون‌ها [۹]، مگنون‌ها [۱۰] و سیستم‌های فرمیونی دو لایه‌ای [۱۱] با استقبال بسیار فراوانی روبرو شده است. در این میان اکسیتون‌ها به عنوان بوزون‌های ترکیبی [۱۲] که از دیرباز رفتار بس ذرّه‌ای آنها به علت جرم سبکشان در مقایسه با جرم اتم‌های گازی مورد توجه بوده، بخش وسیعی از مطالعات را به خود اختصاص داده‌اند. جرم سبک اکسیتون‌ها آنها را کاندیدهای بسیار مناسبی برای بررسی پدیده‌های کوانتمی ماکروسکوپیک همدوس همچون ابررسانایی، ابرشارگی، لیزرهای

---

[٦] coherent collective phenomena
[۷] Bose-Einstein condensation=BEC
[۸] exciton
[۹] exciton-polariton
[۱۰] magnon
[۱۱] fermionic bilayer system
[۱۲] composit Boson

اکسیتون—پلاریتونی و چگالشِ بوز—انیشتنِ دمای بالا قرار داده است. اما مشکل عمده اکسیتون‌ها طول عمر کوتاه آنها در مقایسه با طول عمر بینهایت اتم‌ها می‌باشد. چنین ضعفی مانع از شکل گیری نظم بلند برد و بالطبع آن همدوسی در سیستم اکسیتونی می‌شود. برای فائق آمدن بر چنین مشکلی ایده اکسیتون‌های غیر مستقیم [۱۳] مطرح شد. در این سیستم‌ها الکترون‌ها و حفره‌های سازنده اکسیتون بلحاظ فضایی طوری جدا هستند که برهمکنش بین الکترون—حفره قوی است و فرایندهای بازترکیب [۱۴] و تونل زنی [۱۵] را بهتر می‌توان کنترل کرد. عمده کارها تا کنون بر پایه بررسی خواص اکسیتونی در نیمه رسانای سه بعدی [۱۶] و با هندسه‌های تخت انجام گرفته است. امروزه بدلیل پیشرفت های تکنولوژیکی در ساخت نانوساختارهای غیر مسطح، امکان بررسی خواص اکسیتونی بس ذرّه‌ای در چنین ساختارهایی فراهم شده است. در این رساله به منظور طراحی و ساخت گاز اکسیتونی یک بعدی (1D [۱۷])، مدلی از نانولوله‌های نیمه رسانا دو جداره بر پایه چاه‌های کوانتمی نوع—II ارائه می دهیم. هدف ما بررسی خواص تک ذرّه ای و بس ذرّه‌ای گاز اکسیتونی 1D از جمله فرایند فرمیونی شدن اکسیتون‌ها بعنوان بوزون‌های ترکیبی و بررسی امکان چگالشِ بوز—انیشتن اکسیتونی در این سیستم الکترون—حفره استوانه‌ای می باشد. برای این منظور رساله به صورت زیر سازماندهی شده است:

در فصل دوّم به بررسی رفتار اکسیتون‌ها به عنوان بوزون‌های ترکیبی در سیستم‌های حالت جامد می‌پردازیم. هم نیمه‌رساناهای سه بعدی و هم چاه‌های کوانتومی معرفی می‌شوند و اهمیت رفتار اکسیتونی این سیستم‌ها در بررسی پدیده‌های کوانتمی همدوس بررسی می‌شود. تمرکز خاصی بر روی سیستم‌های الکترون—حفره که در آنها الکترون‌ها و حفره‌ها به لحاظ فضایی جدا هستند، یعنی چاه‌های کوانتمی نوع—II، خواهیم داشت و خواص اکسیتونی آنها مرور خواهد شد.

در فصل سوّم گاز بوزونی غیربرهمکنشی بطوراجمالی بررسی می‌شود. به طور اختصار به شالوده‌های چگالشِ بوز—انیشتن به عنوان یک پدیده کوانتمی ماکروسکوپیک که عمدتاً در سیستم‌های اتمی سه بعدی بکار رفته‌اند می‌پردازیم. مطالب ارائه شده در این فصل کمک خواهند کرد که بررسی امکان بروز پدیده چگالش بوزونی در سیستم‌های با بعد پایین با سهولت بیشتری دنبال شود.

در فصل چهارم با استفاده از مطالب ارائه شده در فصل سوّم، گاز بوزونی برهمکنشی و تئوری‌ها و تقریب‌های استاندارد حاکم بر آن به طور اجمالی بررسی می‌شوند. مطالب این فصل در واقع شروع مناسبی برای بررسی آثار بس ذرّه‌ای در گاز اکسیتونی برهمکنشی

---

[۱۳] indirect exciton
[۱۴] recombination
[۱۵] tunneling
[۱۶] bulk
[۱۷] one-dimensional=1D

می‌باشند. عمده توجه به آثار ابعاد بر خواص گاز بوزونی برهمکنشی بوده و به طور خاص به مطالعه گاز بوزونی یک بعدی می‌پردازیم. نشان خواهیم داد که چه تفاوت‌های بنیادی بین گاز بوزونی برهمکنشی یک بعدی و سه بعدی وجود دارد. پدیده پراکندگی بین دو بوزون در خلأ و همچنین در ماده در رژیم انرژی‌های پایین با استفاده از ماتریس—T معرفی می شود. آنچه در فصل چهارم گردآوری شده است یک مرور اجمالی بر عمده کارهای نظری و بس ذرّه‌ای به کار رفته در سیستم‌های بوزونی اتمی است که قابل استفاده در سیستم‌های ماده چگال هستند.

نهایتاً، در فصل پنجم مدلی را برای بررسی خواص گاز اکسیتونی شبه یک بعدی [۱۸] و بالطبع آن بررسی امکان چگالشِ بوز—انیشتنِ اکسیتونی در سیستم‌های الکترون—حفره استوانه‌ای دو جداره ارائه خواهیم داد. در حقیقت ما با معرفی این مدل به دنبال پاسخ به این پرسش‌ها هستیم:

۱— آیا گاز اکسیتونی شبه یک بعدی مدل ارائه شده، در دماهای بسیار پایین و چگالی‌های کم چگالشِ کامل [۱۹] (چگالش بدون افت و خیز در چگالی و فاز چگالیده [۲۰]) یا چگالشِ جزئی [۲۱](چگالش بدون افت و خیز در چگالی چگالیده ولی با افت و خیز در فاز آن) از خود نشان خواهد داد؟

۲— آیا چنین گازی در دماهای بسیار پایین و چگالی‌های کم رفتار بوزونی خود را حفظ خواهد کرد یا اینکه فرایند فرمیونی شدن [۲۲] اکسیتون‌ها رخ می‌دهد؟

فرایند پراکندگی اکسیتون—اکسیتون در این مدل بررسی می‌شود و نشان داده خواهد شد که دافعه بودن این پتانسیل شرط لازم برای چگالشِ بوز—انیشتنِ اکسیتونی در یک نانولوله دو جداره نیمه‌رساناست ولی شرط کافی نیست، زیرا برای داشتن چگالش کامل باید افت و خیزهای چگالی و فاز چگالیده هر دو منکوب شوند [۲۳] به طوری که سیستم در یک حالت کاملاً همدوس [۲۴] قرار گیرد. همچنین در فاز چگالش جزئی، شبه چگالش [۲۵]، افت و خیزهای چگالی چگالیده منکوب ولی افت و خیزهای فاز هنوز همچنان حضور دارند. در این حالت سیستم بطور جزئی همدوس [۲۶] می‌باشد. بنابراین، در رژیم چگالی‌های اکسیتونی پایین و رژیم دماهای پایین، گاز اکسیتونی برهمکنشی مدل ما در فاز چگالش کامل و یا حتی شبه—چگالش قرار نمی گیرد. با این حال، محاسبات فرایند فرمیونی شدن گاز بوزونی اکسیتونی را در این مدل در رژیم چگالی‌های پایین و رژیم دماهای پایین پیش بینی می‌کنند. در این حالت هم افت و خیز چگالی

---

[۱۸] quasi-one-dimesional=q1D
[۱۹] pure condensation
[۲۰] condensate
[۲۱] partial or phase-fluctuating condensation
[۲۲] fermionization
[۲۳] suppress
[۲۴] fully coherente
[۲۵] quasi-condensation
[۲۶] partially coherente

و هم افت و خیز فاز چگالیده وجود دارند و سیستم در حالت ناهمدوسی کامل [۲۷] خواهد بود.

شایان ذکر است که تحقیق در گازهای بوزونی تبهگن هم در سیستم‌های اتمی و هم سیستم‌های ماده چگال بالاخص اکسیتون‌ها و پلاریتون‌ها در نیمه رسانا با اشتیاق و به شدّت پیگیری می‌شوند. بویژه فیزیکدان‌ها بدنبال مدل‌هایی در سیستم‌های ماده چگال هستند تا بتوانند با استفاده از چنین چگالیده‌هایی پدیده‌های همدوس دیگر همچون ابررسانایی، ابرشارگی و لیزرهای اکسیتون—پلاریتون را نیز بررسی کنند[۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۲۷، ۳۵، ۳۸].

[۲۷] fully decoherente

فصل ۲

اکسیتون‌ها: بوزون‌های ترکیبی

۲—۱ مقدمه

از زمان اولین مشاهده آزمایشگاهی چگالشِ بوز—انیشتنِ اتمی در سال ۱۹۹۵، موضوع سیستم‌های بوزونی تبهگن، یعنی مایع‌های کوانتمی بوزونی، بخش وسیعی از مطالعات را هم در فیزیک اتمی و هم در فیزیک ماده چگال به خود اختصاص داده است[۴ ،۳ ،۲ ،۱]. چنین مایع کوانتمی ممکن است چگالیده شود و تعداد ماکروسکوپیک از بوزون‌ها در یک حالت کوانتمی قرار گیرند. اما تحقیق برای بررسی امکان چگالش در دیگر سیستم‌های بوزونی از جمله اکسیتون‌ها[۹ ،۸ ،۷ ،۶ ،۵]، اکسیتون—پلاریتون‌ها در میکرو کاواک‌های نیمه رسانا [۱][۱۲ ،۱۱ ،۱۰]، مگنون‌ها[۱۳] و سیستم‌های دو لایه‌ای فرمیونی[۱۴] هنوز به شدّت ادامه دارد. بعد از اولین پیشنهادهای نظری که برای امکان چگالش اکسیتون‌ها توسط موسکالنکو [۲][۱۵]، بلات [۳][۱۶] و کلدیش [۴][۱۷] در دهه ۱۹۶۰ ارائه شده است، اکسیتون‌ها و پلاریتون‌ها در سیستم‌های حالت جامد از اقبال بسیار بالایی برای بررسی پدیده‌های کوانتمی ماکروسکوپیک از جمله چگالش برخوردارند. این موضوع در واقع به علت جرم کم آنها در مقایسه با بوزون‌های اتمی می‌باشد که امکان دسترسی به چگالش را در دماهای بحرانی به مراتب بالاتر فراهم می‌کند.

پدیده‌های کوانتمی میکروسکوپیک همچون تداخل یا همدوسی فاز بین حالت‌های کوانتمی مختلف به علت فقدان همبستگی قوی بین حالت‌های کوانتمی در سیستم‌های ماکروسکوپیک بندرت ظاهر می‌شوند. یک سیستم اکسیتونی کاندید مناسبی برای مشاهده آثار کوانتمی جمعی می‌باشد. در رژیم چگالی‌های پایین، اکسیتون‌ها در نیمه رساناها رفتار بوزونی دارند

---

[۱] semiconductor microcavity
[۲] Moskalenko
[۳] Blatt
[۴] Keldysh

و انتظار گذار فاز به حالت چگالش معقول می‌باشد. در واقع داشتن یک فاز چگالیده در سیستم‌های حالت جامد راه را برای بررسی پدیده‌های همدوس ماکروسکوپیک باز می‌کند. چگالشِ بوز—انیشتنِ اکسیتونی در حقیقت اثر منحصر بفردی است که در آن از درجات آزادی الکترونیکی سیستم‌های حالت جامد برای بررسی همدوسی فاز کوانتمی استفاده می‌شود. این پدیده شبیه چگالشِ بوز—انیشتن در سایر سیستم‌های بوزونی همچون هلیوم مایع و بخارات سرد شده اتم‌های قلیایی می‌باشد. بررسی سیستم‌های بوزونی با برهمکنش قوی [۵] و ضعیف [۶] امروزه بخش عظیمی از تحقیقات را در مورد سیستم‌های برهمکنشی همدوس [۷] به خود اختصاص داده‌اند. از جمله سیستم‌های با برهمکنش قوی می‌توان به هلیوم—۳ و هلیوم—۴ در حالت اتمی و ابررسانایی BCS [۸] و $HTCS$ [۹] در جامدات اشاره کرد. در مقابل بخارات قلیایی در حالت اتمی و گازهای اکسیتونی و دو—اکسیتونی [۱۰] در جامدات از جمله سیستم‌های با برهمکنش ضعیف هستند. تفاوت مهم پدیده‌های همدوسی در سیستم‌های بوزونی اتمی با سیستم‌های بوزونی حالت جامدی در دمای تبهگنی کوانتومی آنهاست که در دومی به علت جرم سبک‌تر خیلی بالاتر از اولی است.

در این فصل مطالعات انجام گرفته بر روی پدیده‌های همدوس اکسیتونی در نیمه رساناهای حجمی [۱۱] با ارائه مقدمه‌ای بر بوزون بودن اکسیتون‌ها مرور می‌شود و با این پیش زمینه مدل یک بعدی اکسیتونی بکار گرفته شده در این رساله را در فصل پنجم به تفصیل توضیح می‌دهیم.

۲—۲ اکسیتون چیست؟

اکسیتون یک ذره ترکیبی از دو فرمیون، الکترون با بار منفی و حفره با بار مثبت، است که بین آنها پتانسیل کولنی جاذبی وجود دارد. این پتانسیل جاذبی به کاهشی در انرژی کل سیستم الکترون—حفره منجر می‌شود. به علت برهم‌کنش جاذبی الکترواستاتیک بین دو فرمیون در اکسیتون‌ها، آنها از نظر فضایی فشرده [۱۲] هستند. این درست خلاف زوج های کوپر در ابررساناهای دمای پایین است، زیرا فرمیون‌های آنها توسط یک فونون ضعیف طوری بهم جفت می‌شوند که طول همبستگی بسیار بلندی دارند. اندازه اکسیتون‌ها متفاوت است و می تواند به اندازه یک اتم منفرد از یک آنگستروم تا صدها آنگستروم باشد. بنابراین بر اساس اندازه، اکسیتون‌ها را به دو گروه تقسیم بندی می‌کنند، یکی اکسیتون فرنکل [۱۳][۱۸] که در

[۵] strong
[۶] weak
[۷] interacting coherent systems
[۸] Bardeen-Cooper-Sherifer
[۹] high temperature superconductors
[۱۰] biexciton
[۱۱] bulk semiconductors
[۱۲] compact
[۱۳] Frenkel exciton

محدوده یک ثابت شبکه جایگزیده است و دیگری اکسیتون مات—وانیر [۱۴] [۲۰، ۱۹] که روی چندین ثابت شبکه گسترده است. اینکه اکسیتون یک بوزون است بدین دلیل است که در واقع جفت شدن [۱۵] دو فرمیون با اسپین نیمه صحیح می‌باشد [۲۱]. بنابراین تمام خواصی را که برای بوزون‌های ایده‌ال و برهم‌کنشی در فصول بعدی بیان خواهد شد قابل کاربرد در مورد اکسیتون‌ها نیز می‌باشند.

در یک نیمه رسانا (در ابعاد مختلف) الکترون‌های نوار ظرفیت با گرفتن انرژی از طریق یک پتانسیل خارجی مثل تابش برانگیخته شده و به نوار رسانش می‌روند و حفره حاصل با الکترون می‌توانند تشکیل یک اکسیتون دهد. این اکسیتون‌ها می‌توانند درون کریستال حرکت کرده و با هم یا فونون‌های شبکه برهمکنش کنند و بعد از مدت زمانی که بین پیکو ثانیه تا میلی ثانیه می‌باشد باز ترکیب شده و انرژی خود را به صورت فوتون یا فونون و یا ترکیب این دو پس دهند. از اینرو اکسیتون‌ها ناپایدار هستند مگر اینکه الکترون و حفره در دو محیط فضایی جداگانه باشند.

عبور نور از یک لایه با ضخامت کمتر از طول موج نور را می‌توان با مدل اکسیتونی توضیح داد. نور تابیده شده بر سطح یک لایه باعث بوجود آمدن اکسیتون‌هایی می شود که قادرند درون ماده حرکت کنند و با بازترکیب شدن در سطح دیگر لایه نور را پس دهند. باید توجه کرد که ترابرد اکسیتون درون ماده همدوس نیست و در این مدل همدوسی نور لیزر بهم می‌ریزد. اگر اکسیتون‌ها در یک حالت همدوس باشند در آن صورت بر مشکل ناهمدوسی غلبه می‌کنیم. اکسیتون‌ها فقط با رفتن به فاز چگالیده همدوس می‌شوند، این موضوع در واقع ایده اصلی چگالش بوز—انیشتن اکسیتونی می‌باشد [۲۱].

۲—۳ گذارهای فاز اکسیتون‌ها

بسته به چگالی عددی، دما و ابعاد، گاز اکسیتون می‌تواند در فازهای ترمودینامیکی متفاوتی قرار گیرد (شکل ۱). به عبارت دقیق تر عوامل فوق الذکر تعین می‌کنند که گاز اکسیتونی رفتار بوزونی یا فرمیونی از خود بروز دهد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که آثار اکسیتونی در دماهای پایین، چگالی‌های پایین و ابعاد پایین بسیار قوی‌اند [۳۰]. در چگالی‌های بالا آمار بوزونی گاز به آمار فرمیونی تبدیل می‌شود، یعنی فرایند فرمیونی شدن برای گاز اکسیتونی محتمل است. البته بستگی دارد در چه بعدی باشیم. در سه بعد و در چگالی‌های پایین گاز اکسیتونی سرشت بوزونی خودش را حفظ می‌کند ولی در چگالی‌های بالا گاز بوزونی سرشت فرمیونی پیدا می‌کند و به صورت یک مایع الکترون—حفره [۱۶] می‌شود. در این حالت پتانسیل

[۱۴] Wannier exciton or Wannier-Mott exciton
[۱۵] pairing
[۱۶] electron-hole liquid