مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

۳۹۷۳۵

۱۳۸۱ /۱/ ۳۰

دانشگاه سیستان و بلوچستان
تحصیلات تکمیلی
گروه فیزیک

017068

تراکم بوز - اینشتین و ابر شارگی در هلیوم مایع

استاد راهنما :
دکتر محمد ابراهیم زمردیان

تحقیق و نگارش:
ذبیاب صحبت زاده

بهمن ۱۳۸۰

۳۹۷۰۵

بسمه تعالی

صفحه الف

این پایان‌نامه با عنوان ***تراکم بوز-اینشتین و ابرشارگی هلیوم مایع*** قسمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد ***فیزیک*** گرایش ***حالت جامد*** توسط دانشجو ***ذبیهاب صحبت‌زاده*** تحت راهنمائی استاد پایان‌نامه ***آقای دکتر محمدابراهیم زمردیان*** تهیه شده است. استفاده از مطالب آن بمنظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می‌باشد٪

امضاء دانشجو

این پایان نامه ***شش*** واحد درسی شناخته می‌شود و در تاریخ ۸۰/۱۱/۱۶

توسط هیئت داوران بررسی و نمره ۱۹ با درجه عالی به آن تعلق گرفت٪

	نام و نام خانوادگی	امضاء	تاریخ
۱ـ استاد راهنما:	***دکتر محمدابراهیم زمردیان***		
۲ـ داور ۱:	***دکتر حسین فراشباشی***		
۳ـ داور ۲:	***دکتر محمد گشتاسبی راد***		
۴ـ تحصیلات تکمیلی:	***علیرضا آقایی***		

تقدیم به روح پاک و بلند پدر سفر کرده ام

که قلب مملو از مهر و صفای او گرمابخش خانه امیدم و اندیشه بلند او راهنمای راهم و روح طیب او دعا گویم بود .

تقدیم به مادر فداکار و مهربانم

که مجسمه صبر وگذشت و ایثار بود و گوهر وجودش را کریمانه برای بهتر بودن و ماندنمان عطا نمود .

تقدیم به همسر عزیز و صبورم

که هر آنچه داشت در طبق اخلاص نها تا مرارت روزهای پر محنت را کمتر احساس کنم او که با کاسیتهای زندگیم ساخت تا شاهد این روز خجسته گردیم .

تقدیر و تشکر

بنام خدای قلم

سپاس و ثنا مخصوص یگانه معبودی است که دریچه های نور و دانایی را به روی بندگان خود گشود . او که به قلم قسم یاد نمود و مطلع پیام آسمانی اش را چنین آغاز نمود : ((ن ، والقلم و مایسطرون)) .

سلام و صلوات خدا بر محمد (ص) رسول برگزیده او که علم و دانایی را مرتبتی ویژه بخشید و اسیران را در قبال آموزش علم گوهر آزادی عطا نمود و طلب آنرا در هر جایی ولو دوررس توصیه نمود .

خدای مهربان را شاکریم که بار دیگر این توفیق را نصیب این بنده حقیر خود نمود تا بتواند گامی دیگر در فراگیری و آشنایی با دنیای پر راز و رمز علم بردارد .

از استاد فرزانه و با کرامت جناب آقای دکتر محمد ابراهیم زمردیان عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد که تمام سعی و تلاش خود را در راه هر چه بهتر به نتیجه رسیدن این تحقیق به کار بردند و از هر آنچه که در توانشان بود دریغ ننمودند . و همواره با آغوش باز و با آن اخلاق کریمه شان پذیرایمان بودند نهایت تشکر و امتنان را داریم . امید که منش علمی و اخلاقی آن بزرگوار همواره نصب العین این بنده حقیر گردد .

از جناب آقای دکتر حسین فراشباشی عضو هیئت علمی دانشگاه بیرجند که تقبل زحمت فرمودند و داوری این پایان نامه را بر عهده گرفتند نهایت سپاس و قدردانی را دارم .

از جناب آقای دکتر گشتاسبی راد عضو هیئت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان که بعنوان داور داخلی متحمل زحمت گردیدند . وما را از راهنماییهای مشفقانه شان بی نصیب نفرمودند صمیمانه تشکر می نمایم .

لازم می دانم در اینجا از مادر عزیز و محنت کشیده ام که وجودم بعد از خدا مدیون اوست. و چون کوهی ستبر در برابر تمام کاستیها قد برافراشت و چون شمع آب شد تا درخت زندگی مان را تناور سازد و چشم

بر روی همه خواسته ها بست تا شاهد شکوفایی ، فرزندانش شود با زبان قاصر سپاسگزاری می نمـایم . و سجده امتنان بر آستان ربوبی گونه آن غمخوار بی منت می سایم . و امید بر آن دارم که فرزنـدی شایسـته برای آن اسوه صبر و گذشت و عطوفت باشم .

از همسر عزیزم در این مدت یک و نیمی سالی که از زندگی مشترکمان و تقریبـا از شـروع کـار تحقیقـی ام می گذرد نهایت تشکر و سپاس را دارم . او که شاهد و ناظر لحظـه بـه لحظـه مسـائل و مشـکلات تحقیقـی اینجانب و معضلات طبیعی زندگی بود ، حقی بزرگ در طی این طریق به گردن حقیر دارند . چرا که چشم از خیلی از حقوق اولیه خود فرو بست تا بتوانم با آرامش خیال این مسیر صعب العبـور را بـه انتـها برسـانم . تلاشها و صبرش را ارج می نهم و از خدای رحمان توفیق جبران این همه خوبی و گذشت را دارم .

از یکا یک اعضای خانواده ام ، برادران و خواهران عزیزم که چشم به موفقیت اینجانب در ایـن راه پرفـراز و نشیب داشتند و از حمایتهای بی دریغ و خالصانه آنها در تمام مقاطع تحصیلی ام بهره مند بوده ام نـهایت حق شناسی و قدردانی را دارم . امیدوارم که الطاف آنها را پاسـخی نیکو دهم .

از خانواده محترم همسرم که در این مقطع از زندگی و تحصیلـم یـاریگرم بـوده انـد و مـرا مـورد لطـف و عنایت خود قرار داده اند نهایت تشکر و امتنان را دارم .

از دوست عزیز و صمیمی ام جناب آقای حسین شرفی که برادر وار در این مدت ما را همراهـی کردنـد . و از هیچ تلاشی فرو گذار ننمودند نهایت سـپاس و تشـکر را دارم . امیـدوارم خوبیـهایش را بـه نحـو احسـن جبران نمایم .

چکیده

تراکم بوز- اینشتین در گازهای اتمی و پدیده ابر شارگی در هلیوم مایع

بوسیله

ذبیاب صحبت زاده

بوزونها یکی از خواص کوانتومی ذرات بنیادی فیزیک می باشند که دارای اسپین های صحیح بوده و قادرند در یک حالت کوانتومی قرار گرفته و تراکم بوز-اینشتین را بوجود آورند که لازمه این امر دمای نزدیک به صفر مطلق می باشد. رفتارآماری بوزونها توسط آمار بوز- اینشتین بیان می شود.

در این تحقیق ابتدا به جزئیات رفتار فیزیکی دستگاههای بوزایده ال می پردازیم که از بر هم کنش های متقابل درون مولکولی آن صرفنظر شده است و کمیات ترمودینامیکی مربوطه را محاسبه خواهیم نمود. در ادامه به تاثیرات برهم کنشی و نقش آن در تابع موج و انرژی حالت پایه خواهیم پرداخت. و فرمولبندی تئوری میدان میانگین که اساس آن معادله Gross- Pitaevskii است را توسعه می دهیم و حالت برهم کنشی گازها را با لحاظ نمودن نیروهای جاذبه و دافعه بین آنها در نظر می گیریم همچنین هلیوم مایع را بعنوان نمونه ای از دستگاه ذرات در حال بر هم کنش با یکدیگر مورد مطالعه قرارداده و خواص ابرشارگی آنرا بررسی خواهیم نمود. در ادامه این تحقیق معادلات هیدرودینامیکی ابرشاره ها و سرعت صورت در هلیوم را بدست خواهیم آورد و نهایتاً به معرفی چندین خواص هلیوم مایع با استفاده از نتایج تجربی خواهیم پرداخت.

فهرست

عنوان صفحه

۱- تراکم بوز - اینشتین ، شکل جدیدی از ماده ۱

۲- سیستم های بوز ایده ال ۸

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- رفتار ترمودینامیکی یک گاز بوز ایده ال ۹

۲-۳- تابش جسم سیاه ۳۱

۳- تاثیرات برهم کنشی روی حالت پایه در دستگاههای بوز ۵۱

۳-۱- مقدمه ۵۱

۳-۲- پارامتر نظم و نظریهٔ میدان - میانگین ۵۱

۳-۳- حالت پایه ۶۰

۴- نظریهٔ ابرشارگی هلیوم II ۶۸

۴-۱- مقدمه ۶۸

۴-۲- طیف انرژی یک مایع کوانتومی ۷۰

۴-۳- ظرفیت گرمایی هلیوم II ۷۴

۴-۴- ابرشارگی هلیوم II در صفر مطلق ۷۶

۴-۵- هلیوم II در دماهای بالاتر از صفر مطلق ۷۹

۴-۶- معادلات هیدرودینامیکی هلیوم II ۸۸

۴-۷- انتشار صوت در هلیوم II ۹۴

۵- بررسی خواص هلیوم مایع با استفاده از نتایج تجربی ۱۰۰

۵-۱- مقدمه ۱۰۰

۵-۲- تاریخچهٔ پیشرفت شناخت خواص هلیوم مایع در دماهای پایین ۱۰۰

۵-۳- ابرشارگی و قضیهٔ دو شاره ای ۱۰۲

۵-٤- اثرات گرمایی ۱۰٦

۵-۵-فیلم هلیوم مایع ۱۱۱

۵-٦- انتشار امواج در هلیوم II ۱۱٤

فصل اول

تراکم بوز - اینشتین ، شکل جدیدی از ماده

۱

تراکم بوز - اینشتین ، شکل جدیدی از ماده

ذرات بنیادی فیزیک ، دارای دو نوع خاصیت کوانتومی مجزا می باشند ، که عبـارتند از : فرمیونهای انفرادی و بوزونهای اجتماعی .

فرمیونها دارای اسپین نیمه صحیح بوده و رفتار داخلی شان توسط اصل انحصار پاؤلی توصیف می شود و هر ذره مجاز به قرار گرفتن در یک حالت کوانتومی است . بوزونها ، دارای اسپینهای صحیح بوده و تعداد زیادی از آنها می توانند در یک حالت کوانتومی قرار بگیرند .

تمایل گروهی بوزونها ، اخیراً در آزمایشی توسط Carl wiemam از دانشگاه Coloradoو Eric Corml از مؤسسه بین المللی استاندارد و تکنولوژی و همگروه آنها به اثبات رسید . آنها توانستند ، گاز اتمهای Rb^{87} را باندازه ای سرد کنند تا هزاران اتم در حالت کوانتومی یکسانی قرار گیرند و شکل جدیدی از ماده موسوم به تراکم بوز - اینشتین (BEC) را تشکیل دهند .

برای پی بردن به مفهوم تراکم بوز - اینشتین ، نیازمند بحث در خصوص مکانیک کوانتومی اسپین هستیم . وقتی جسمی دارای جرمی، نظیر فرفره ، می چرخد یا شبیه یک سیارد در مدار خود حرکت می کند ، در فیزیک می گوییم که آنها دارای تکانه زاویه ای می باشند . اگر برآیندگشتاور نیروهای خارجی وارده بر جسم صفر باشد ،تکانهٔ زاویه ای بقا دارد . برای مثال در منظومه شمسی ما ، بقای تکانه زاویه ای ، سیاره ها را در مداراتشان نگه می‌دارد و هر مداری ، تکانه زاویه ای تقریباً ثابت و معینی‌دارد .

در مکانیک کوانتومی تکانهٔ زاویه ای یک دستگاه در تابع موج آن مستتر است . برای مثال ، اتمی که تکانه زاویه ای و تابع موج معینی دارد را درنظر بگیرید .اکنون فرض کنید که این اتم به آرامی باندازهٔ ۳۶۰ درجه بچرخد و به حالت اولیهٔ خودش برگردد . بنظر میرسد که اتم چرخیده از اتم اولیه غیر قابل تشخیص باشد و تابع موج آن پس از دوران ۳۶۰ درجه ای با تابع موج غیر چرخیدهٔ اولی یکسان باشد .

با اینهمه ، همانند بودن وضع ظاهری توابع موج چرخیده و غیر چرخیده ، به نتیجهٔ جالبی منجر می شود : فقط اتمهای (و در حالت کلی دستگاههای) داری تکانه زاویه ای برابر با حاصلضرب عدد صحیح در $\frac{h}{2\pi}$ به حالت یکسانی پس از دوران ۳۶۰ درجه بر میگردند ، که موسوم به کوانتش تکانهٔ زاویه ای است و یکی از نتایج اساسی مکانیک کوانتومی است .

کوانتش تکانه زاویه ای ، که از اولین فرمولبندی مکانیک کوانتومی در اواسط سال ۱۹۲۰ ظاهر شد ، نتیجهٔ فوق العاده خوشایندی بود. بدلیل اینکه، نقش مهمی در متقاعد ساختن

فیزیکدانها در اعتبار فرمولبندی کوانتومی داشت . چون یک دهه قبل ، کوانتش تکانه زاویه ای فرضیهٔ مورد استفاده توسط Neils Bohr بود ، که نهایتاً به مدل بوهر اتم موسوم شد . مکانیک کوانتومی جدید اصولی که زیر بنای فرضیهٔ بوهر بود را آشکار نمود .

نتیجهٔ خوشایند فوق چندی بیش دوام نداشت . در سال ۱۹۳۰ ، کشف شد که الکترونها ، کوانتش اندازه حرکت زاویه ای را نقص می کنند . در آن تحقیق ملاحظه شد که الکترونها دارای تکانهٔ زاویه ای – که موسوم به اسپین است– $\frac{1}{2}\left(\frac{h}{2\pi}\right)$ میباشند . الکترون نظیر یک فرفرهٔ دوار ، رفتار می کند و گفته میشود که ذرهٔ با اسپین ½ میباشد . به این معنی که تابع موج‌الکترون ، وقتی که الکترون ۳۶۰ درجه می‌چرخد، به همان حالت کوانتومی اولیه بر نمی گردد . ولی در حالتی که باندازه ۷۲۰ درجه (دو برابر ۳۶۰ درجه) میچرخد ، توابع موج حالات اولیه و نهایی یکی است .این وضعیت برای پروتونها ، نوترونها و سایر ذرات با اسپین ½ صادق است .

جهان ما از ذراتی تشکیل یافته است که برخی از آنها دارای اسپین نیمه صحیح بوده و برخی اسپین صحیح دارند . کوارکها و لپتونها و ذراتی نظیر پروتونها ، نوترونها و بسیاری از هسته ها و اتمها همگی دارای اسپین نیمه صحیح می باشند . در مقابل فوتونها و ذرات دیگر نظیر مزونها ، هسته ها و سایر اتمهایی که اسپین نیمه صحیح اجزای آنها به همدیگر افزوده و یا اثر همدیگر را خنثی می کنند ، نهایتاً دارای اسپین صحیح می شوند . ذرات‌با اسپین صحیح بوزون ها نامیده می شوند ، زیرا آمار رفتار آنها در حالت گروهی ، توسط آمار بوز – اینشتین بیان می شود . که ابتدا توسط

S.N.Bose و Albert Einstein پیشنهاد گردید . ذرات دارای اسپین نیمه صحیح، فرمیونها نامیده میشوند ، زیرا آمار رفتار آنها ، از آمار Fermi – Dirac تبعیت می کند ، که توسط Enrico Fermi و Paul Dirac بکار برده شد .

فرمیونها بشدت دارای انحصارات محلی میباشد .بدین معنی که اگر یک فرمیون ، در یک حالت کوانتومی خاصی باشند ، در اینصورت سایر فرمیونها نمی توانند در آن حالت قرار بگیرند . این پدیده نتیجه ای از اصل انحصار پاولی است. در جهانی که الکترونها بجای فرمیون ، بوزون بودند ، هیچ زندگی ایی متصور نبود . در اینصورت الکترونهای بوزونی حول اتمها ، بجای تشکیل لایه های متضمن الکترونهای ظرفیت، که عملیات شیمیایی توسط آنها صورت می گیرد ، بصورت توده وار در مدار داخلی اتم قرار می گیرند ، در اینصورت علم شیمی و نیز زندگی غیر ممکن می شود . بوزونها ، بعبارت دیگر گروههای اجتماعی هستند . اگر یک بوزون در یک حالت کوانتومی باشد ، سایر بوزونها به همان حالت جلب می شوند . بوزونهای بیشتری که در حالت خاصی بصورت توده ای در می آیند تمایل شدیدی به پیوستن سایر بوزونها به جمعشان دارند . در چنین حالتی تعداد خیلی زیاد از ذرات یک تابع موج کوانتومی دارند . این آن چیزی است که تراکم بوز – اینشتین نامیده می شود. و حالت جدیدی از ماده است زیرا - همانگونه که پیش بینی می شد – این پدیده قبلاً در یک سیستم اتمی مشاهده نشده بود .

تمایل گروهی بوزونها مسئول بسیاری از پدیده های جالب و مهم میباشد . برای مثال طرز کار لیزر بدین صورتاست که ، فوتونها از گذارهای اتمی ، سایر فوتونها را جلب

می کنند . توده ای از این گذارهای اتمی ، تشکیل پرتوی از فوتونهای همدوس در حالت کوانتومی یکسان- بواسطه فرایند B.E - می نمایند که نشر برانگیخته نامیده می شوند . همچنین امکان ابررسانی بدین دلیل است که جفتهای بوزونی الکترونهای همبسته از میان ابر رسانا حرکت می کنند و سایر جفت الکترونها را برای پیوستن به حالتشان بسمت خود جلب می کنند . به همین ترتیب هلیوم مایع نیز یک ابر شاره‌است . زیرا اتمهای هلیوم بوزون هستند و تمایل آنها برای اجتماع در یک حالت یکسان ، سبب خواص مایع غیر عادی می شود .

شایان ذکر است لیزر شامل فوتونهاست نه اتمها . ابررسانایی شامل تعدادی جفت برهم‌کنشهای‌الکترونی در فواصل نسبتاً بزرگ است . ابر شارگی شامل بر هم‌کنشهای قوی اتمهای هلیوم میباشد .

برای تولید یک BEC ، گازی از مولکولهای بوزونی برهم‌کنشی ، باید تا چنان دمایی سرد شوند ، تا طول موج دوبروی مولکولها ، بزرگتر از میانگین فاصله بین آنها باشند. از آنجاییکه طول موج دوبروی بطور معکوس متناسب با ریشهٔ مربع دماست و فاصله بین مولکولی با دما افزایش می یابد BEC فقط در دمایی پایین تر از $۲/٤^{0}k$ رخ میدهد. وایمن وکورنل قادر به تولید تراکم بوز -اینشتین اتمهای فوق العاده سرد شدهٔ $Rb^{۸۷}$ شدند . ربیدیم یک فلز قلیایی از ستون اول جدول تناوبی است که دارای اسپین ½ در ساختار لایهٔ الکترونی است ، وروشن است که کاندید خوبی برای تولید BEC نیست . با وجود این ، وقتی گاز اتمهای ربیدیم در یک میدان مغناطیسی قوی قرار می گیرند ، همهٔ