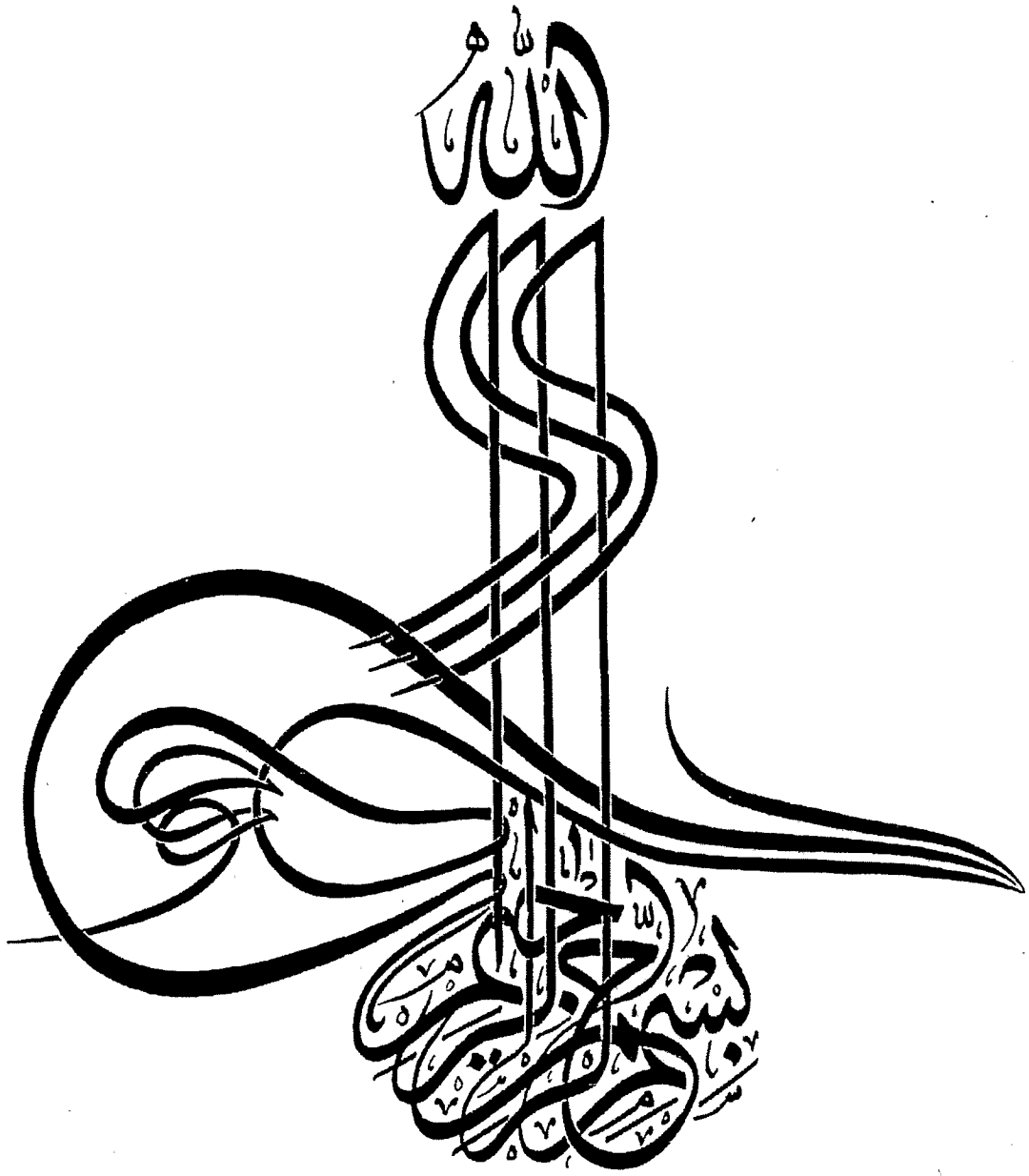


١٠٤٢٧٨

دانشگاه تربیت معلم سبزوار

تاثیر آلاینده‌های خنثی بر روی خواص ترابردی ترکیبات ابررسانای Nd-۱۲۳

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

استاد راهنما

دکتر شعبان رضا قربانی

استاد مشاور

دکتر هادی عربشاهی

۱۳۸۷/۱۰/۰۷ - ۵

نگارش

مریم همایی

شهریور ۸۶

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

۱۰۴۲۷۸

باسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

دانشگاه تربیت معلم سبزوار
دانشکده علوم پایه

جلسه دفاع از پایان نامه خانم **مریم همایی** دانشجوی دوره **کارشناسی ارشد فیزیک** ساعت **۱۰ صبح** روز **شنبه** مورخه **۱۳۸۶/۶/۳** در اتاق **۲۴۳** تشکیل گردید. پس از بررسی و نظر هیأت داوران ، پایان نامه نامبرده با نمره ۱۹٫۲۵ و درجه عالی مورد تأئید قرار گرفت.

عنوان رساله : تأثیرآلاینده های خنثی بر روی خواص ترابردی ترکیبات Nd -۱۲۳

تعداد واحد: ۶ واحد

داور رساله : دکتر مرتضی ایزدی فرد

استادیار دانشگاه صنعتی شاهرود

استاد راهنما: دکتر شعبان رضا قربانی

استادیار دانشگاه تربیت معلم سبزوار

استاد مشاور : دکتر هادی عربشاهی

دانشیار دانشگاه تربیت معلم سبزوار

نماینده تحصیلات تکمیلی : دکتر علی اصغر مولوی

استادیار دانشگاه تربیت معلم سبزوار

مدیر گروه فیزیک : دکتر شعبان رضا قربانی

استادیار دانشگاه تربیت معلم سبزوار

" ... زندگی صحنه یکتای هنرمندی ماست

هر کسی نغمه خود خواند و از صحنه رود

صحنه پیوسته بجاست

ای خوش آن نغمه که مردم بسپارند به یاد ..."

تقدیم به پدر و مادرم

قدردانی

به درگاه کبریا و عظمت پروردگار ستایش می‌گزارم کـه ذات لایـزالش ازلـی اسـت و ازلیـت بـی ابتدایش لایزال و جاودان است. ربوبیت اقدس او را سپاس باد که به ما درس معرفـت و کلمـه شـکر آموخت.

اکنون که در سایه لطف حضرت حق موفق شده‌ام با نگارش این پایان نامه تحصیلات کارشناسـی ارشد خود را به پایان رسانم، لازم می دانم از تمام اساتید و دوستان کـه بـه نحـوی یـاریم نمودنـد، قدردانی نمایم.

از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر قربانی که با راهنمایی‌ها وحمایـت‌هـای خـود، زمینـه تـلاش و تحقیق را با اخلاق نیک خود در من بارور نموده و با حوصـله فـراوان راهکارهـای علمـی را بـه مـن آموختند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. از استاد عالیقدر جناب آقای دکتر عربـشاهی کـه مـشاوره این پایان‌نامه را به عهده داشتند و از استاد محترم جناب آقای دکتر ایزدی فرد کـه قبـول زحمـت نموده و به عنوان داور در جلسه دفاع حضور یافتند بی‌نهایت سپاسـگزارم. از اسـاتید محتـرم گـروه فیزیک که در تمامی مراحل تحصیل در دانشگاه، از حضور و دانش آنهـا بهـره‌هـای فـراوان بـرده‌ام، نهایت سپاس و امتنان را دارم.

از دوستانم خانم‌ها ابری نائی و یزدی‌زاده که بدون کمک آنها اتمام این کار برایم بـسیار مـشکل بود و نیز آقای رستم آبادی که در تصحیح نهایی این پایان‌نامـه مـرا یـاری نمودنـد کمـال تـشکر و قدردانی را دارم.

صمیمانه ترین سپاسگزاری‌های خود را به خانواده مهربانم که با محبتهای بی‌شائبه خود در تمـام مراحل تحصیل و زندگی مشوق و پشتیبان من بودند، ابراز می‌دارم و امیدوارم روزگار مرا به جبـران زحماتی که برای تک تک این عزیزان فراهم آورده‌ام توفیق دهد.

چکیده

ترکیبات ابررسانای Y-۱۲۳ به روش استاندارد واکنش حالت جامد ساخته شده‌اند. در این پایان‌نامه تاثیر آلاینده‌های خنثی بر روی خواص ترابردی نظیر مقاومت ویژه الکتریکی و توان گرماالکتریسیته S این ترکیبات بررسی شده است. مقاومت الکتریکی و توان گرماالکتریسیته به صورت تابعی از دما و غلظت آلایش برای ترکیبات بس‌بلور $Nd_{1-2x}Ca_xTh_xBa_2Cu_2O_{7-\delta}$، $Nd_{1-2x}Ca_xPr_xBa_2Cu_2O_{7-\delta}$ و $Nd_{1-x}Ca_xBa_{2-x}La_xCu_2O_{7-\delta}$ اندازه‌گیری شده است. مقاومت الکتریکی و دمای بحرانی برای تمام نمونه‌ها با افزایش آلایش افزایش می‌یابد، که نشان دهنده کاهش خاصیت ابررسانایی است. توان گرماالکتریسیته تمام نمونه‌ها به جزء آلاینده CaTh با غلظت x =۰/۱، با افزایش غلظت آلایش افزایش می‌یابد. افزایش S کاهش چگالی حفره‌ها در صفحات CuO_2 را نتیجه می‌دهد. از مدل پدیده شناختی نوار باریک برای توصیف داده‌های توان گرماالکتریسیته استفاده شده است. نتایج حاصل از برازش داده‌ها به این مدل افزایش جایگزیدگی حاملها در صفحات CuO_2 را با افزایش غلظت آلایش پیشنهاد می‌کند. از آنجا که آلاینده‌ها از لحاظ الکتریکی خنثی هستند، تراکم حفره‌ها در صفحات CuO_2 ثابت است بنابراین افزایش جایگزیدگی تنها ناشی از کاهش چگالی حالتهای الکترونی، $g(\varepsilon_F)$ است.

واژه‌های کلیدی: تراکم حفره‌ها، چگالی حالتهای الکترونی، مقاومت الکتریکی، توان گرماالکتریسیته، خواص ترابردی، مدل نوار باریک

فهرست مطالب

۱ مفاهیم اولیه ابررسانایی ۱

۱-۱ پیشگفتار ۱

۱-۲ ابررساناهای متعارف ۲

۱-۲-۱ مقاومت صفر ۲

۱-۲-۲ میدان و جریان بحرانی ۴

۱-۲-۳ اثر مایسنر ۵

۱-۲-۴ ابررساناهای نوع I و II ۶

۱-۲-۵ نفوذ میدان؛ معادلات لندن ۷

۱-۲-۶ نظریه BCS ۸

۱-۲-۷ مدل دو شاره‌ای ۱۱

۱-۳ ابررساناهای دمای بالا ۱۱

۲ ساختار و آلایش در ترکیبات ۱۲۳ ۱۴

۲-۱ خواص ابررساناهای RE-۱۲۳ . . . . . ۱۴

۲-۱-۱ ساختار بلوری ۱۴

۲-۱-۲ نمودار فاز ابررساناهای کوپرات ۱۶

۲-۱-۳ دمای بحرانی ۱۸

۲-۲ آلایش در کوپراتهای ۱۲۳ . . . . . ۲۰

۲-۲-۱ تغییر در ظرفیت اکسیژن ۲۱

۲-۲-۲ جانشانی در جایگاه مس ۲۲

۲-۲-۳ جانشانی در مکان باریم ۲۳

۲-۲-۴ جانشانی در جایگاه خاکهای نادر ۲۴

۲-۲-۴-۱ کلسیم ۲۴

۲-۲-۴-۲ پرسدیوم ۲۵

۲-۲-۴-۳ توریم ۲۶

۲-۲-۴-۴ هم آلایشی Ca با Pr و Th ۲۷

۳ خواص ترابردی حالت عادی ابررساناهای RE-۱۲۳ ۲۸

۳-۱ مقاومت الکتریکی ۲۸

۳-۱-۱ مقاومت الکتریکی در ابررساناها ۳۰

۳-۲ رسانندگی گرمایی در ابررساناها ۳۱

۳-۳ آثار گرماالکتریسیته ۳۲
۳-۳-۱ توان گرماالکتریسیته ۳۳
۳-۳-۲ توان گرماالکتریسیته در ابررساناهای دمای بالا ۳۵

۳-۴ مدل نوار باریک ۳۷

۴ ساخت نمونه و روشهای اندازه‌گیری ۳۹

۴-۱ ساخت ابررساناهای سرامیکی ۴۰
۴-۱-۱ روش حالت جامد ۴۱
۴-۱-۲ ساخت نمونه‌های با پایه Y ۴۱
۴-۱-۳ تعیین مقدار اکسیژن ۴۲

۴-۲ تهیه نمونه ۴۳

۴-۳ تعیین ویژگیهای نمونه ۴۶
۴-۳-۱ تعیین ساختار نمونه با استفاده از پراش اشعه X ۴۷
۴-۳-۲ پراش الکترون ۴۸
۴-۳-۳ پراش نوترون ۴۸

۴-۴ اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ۵۰
۴-۳-۱ اتصالات الکتریکی و روش اندازه‌گیری ۵۱
۴-۳-۲ نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ۵۳

۴-۵ اندازه‌گیری توان گرماالکتریسیته. ۵۴

۴-۵-۱ نگهدارنده نمونه ۵۵
۴-۵-۲ روش اندازه‌گیری S و جمع آوری داده‌ها ۵۶

۵ تحلیل داده‌های تجربی ۵۹

۵-۱ مقاومت الکتریکی ۵۹
۵-۳ توان گرماالکتریسیته ۶۲
۵-۳ برازش و تحلیل داده‌های توان گرماالکتریسیته توسط مدل نوار باریک ۶۸
۵-۴ نتیجه گیری ۷۱

فصل ۱

ابررسانایی

۱-۱ پیشگفتار

پس از کشف ابررسانایی توسط کامرلینگ اونس[۱] در سال ۱۹۱۱، مباحث علمی و کاربردی این مواد مورد توجه خاص دانشمندان و محققان قرار گرفت. خواص ترابردی این مواد نظیر مقاومت الکتریکی، توان گرماالکتریسیته و اثر هال اطلاعات مفیدی را برای درک ماهیت حاملها و سازوکار ترابردی در ابررسانای دمای بالا در اختیار ما قرار می‌دهند. علاوه بر این، اطلاعاتی درباره ساختار نواری الکترونیکی مواد، نوع حاملها و بویژه سازوکار پراکندگی به دست آورد.

علاوه بر جنبه پراهمیت کاربردی این مواد، فهم عمیق پژوهشگران برای دستیابی به نظریه ابررسانایی (چه در گذشته برای ابررسانایی متعارف (BCS) و چه در حال برای ابررسانایی دمای بالا) از سیستم‌های شامل میلیاردها ذره با همبستگی قوی شاید در تاریخ علم ماده چگال بی‌سابقه باشد. مشکل اساسی در ابررسانایی متعارف پایین بودن دمای گذار ابررسانایی T_c در حدود دمای هلیوم مایع بود که با پیشرفتهای اخیر این دما با کشف سرامیکهای ابررسانایی دمای بالا به حدود ۱۰۰K (۱۳۵K در ترکیبی از جیوه، که تحت فشارهای خیلی بالابرای این ترکیب اکسید مس جیوه دمای گذار حدود ۱۶۵K نیز گزارش شده است) افزایش یافته است.

---

[۱] Kamerling Onnes

اگرچه می‌توان از نظریهBCS در توضیح پدیده‌هایی نظیر مقاومت صفر، دمای گذار، مقادیر بحرانی و نظایر آنها در ابررساناهای متعارف (دمای پایین) استفاده کرد، لیکن در ابررساناهای کوپرات برای استفاده از این نظریه باید فرایندهای دیگری را برای تشکیل زوج کوپر در نظر گرفت. بنابراین در ابررساناهای دمای بالا توجه ویژه‌ای به خواص نامتعارف حالت عادی می‌شود.

در این فصل مفاهیم اولیه ابررسانایی به صورت مختصر توضیح داده می‌شود. در فصل دوم ساختار ابررساناهای کوپرات ۱۲۳- RE ،آلایش و تاثیر آن در این ترکیبات بیان می‌شود. در فصل سوم به خواص ترابردی نظیر مقاومت الکتریکی و توان گرماالکتریسیته حالت عادی و مدل پدیده شناختی نوار باریک اشاره می‌شود. در فصل چهارم روش‌های ساخت نمونه‌ها و روشهای پراش برای تعیین ساختار ترکیبات و روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و توان گرماالکتریسیته توضیح داده‌می‌شود. در پایان در فصل ۵ به تحلیل داده‌های تجربی توان گرماالکتریسیته و مقاومت نمونه‌های $Nd_{1-x}Ca_xBa_{2-x}La_xCu_3O_{7-\delta}$ و $Nd_{1-x}Ca_xTh_xBa_2Cu_2O_{7-\delta}$ و $Nd_{1-2x}Ca_xPr_xBa_2Cu_2O_{7-\delta}$ می‌پردازیم.

۱-۲ ابررساناهای متعارف

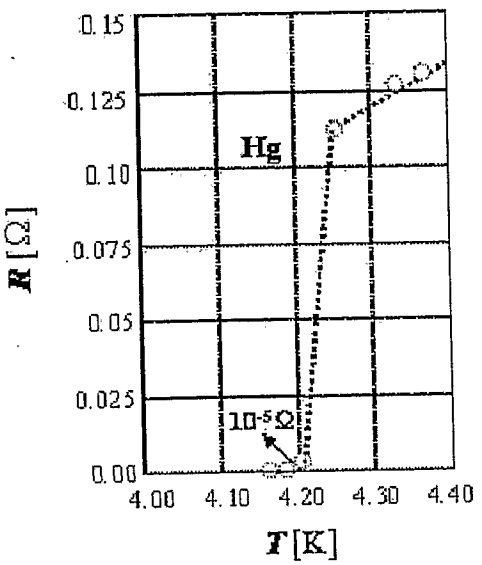
پس از کشف کوپرات‌ها، ابررساناها برحسب دمای بحرانی‌شان به دو دسته‌ی ابررساناهای دمای پایین (متعارف) و ابررساناهای دمای بالا تقسیم می‌شوند.

۱-۲-۱ مقاومت صفر

یکی از مشخصه‌های اصلی پدیده‌ی ابررسانایی، صفر شدن مقاومت الکتریکی در حالت ابررسانایی است. در سال ۱۹۱۰ اونس آزمایشهایی را به منظور اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی فلزات در دماهای

پایین آغاز کرد و در سال ۱۹۱۱متوجه شد که مقاومت الکتریکی جیوه در دماهای ۴/۲K ناگهان کاهش می‌یابد(شکل۱-۱). وی به دلیل اینکه نمونه خواص الکتریکی غیرعادی از خود نشان داد، این حالت را ابررسانایی نامید. وی و همکارانش در ادامه‌ی آزمایشهای خود، خاصیت ابررسانایی را در فلزاتی نظیر قلع و سرب نیز اندازه گرفتند و مشاهده کردند که دمای گذار برای فلزات مختلف متفاوت است. علاوه براین دریافتند که در نزدیکی صفر مطلق، فلزات یک مقاومت ویژه‌ی باقیمانده را از خود نشان می‌دهند که به ناخالصی نمونه وابسته است، بنابراین سعی در بدست آوردن عناصر خالص داشتند[۱].

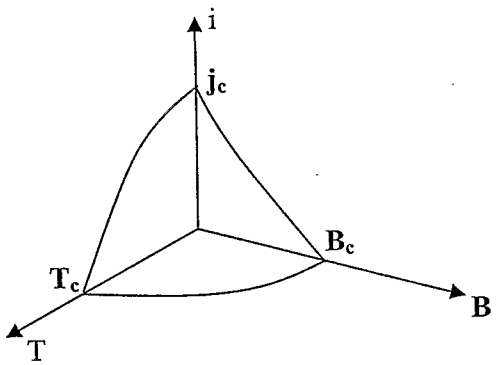
اصولا ممکن نیست که به طور تجربی ثابت کرد که مقاومت الکتریکی در حالت ابررسانایی واقعا صفر است، اما برای مقاصد عملی پذیرفتنی است که مقاومت الکتریکی در زیر T_c صفر فرض شود. مفیدترین روش برای تعیین بیشترین مقاومت الکتریکی در حالت ابررسانایی، القاء یک جریان الکتریکی در داخل یک حلقه ابررسانا و سپس آشکارسازی واپاشی میدان‌های مغناطیسی تولید شده توسط ابرجریانها است[۲].



شکل ۱-۱: مقاومت الکتریکی جیوه در هلیم مایع [۳۲]

۱-۲-۲ میدان و جریان بحرانی

آزمایشهای بعدی اونس پس از کشف ابررسانایی نشان داد که افزایش چگالی جریان بیش از حد معینی که جریان بحرانی (J_c) نامیده می‌شود، ولتاژی را در نمونه ایجاد می‌کند و باعث از بین رفتن ابررسانایی می‌شود. همچنین مشخص شد که این مقدار جریان بحرانی با کاهش دما افزایش پیدا می‌کند. وی چگالی جریان بحرانی را از مرتبه‌ی 10^3 A/mm^3 اندازه‌گیری کرد[۳].



شکل ۱-۲ :نمودار فاز میدان، جریان و دما در ابررساناها

ادامه تحقیقات بنیادی توسط وی در سال ۱۹۱۴ منجر به کشف وجود میدان مغناطیسی بحرانی H_c شد[۴]. آزمایشها نشان داد که یک میدان مغناطیسی به اندازه‌ی کافی قوی، ابررسانایی را از بین می‌برد و مقدار آن تابعی از دماست. مشخص شد که H_c با کاهش دما افزایش پیدا می‌کند و تقریبا از قانون سهموی زیر پیروی می‌کند

$$H_c = H_0[1-(T/T_c)^2] \qquad (1)$$

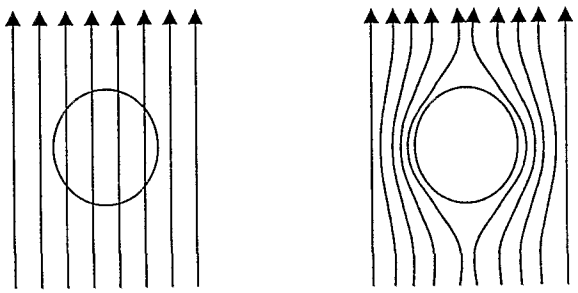
در نتیجه وقتی T به صفر نزدیک می‌شود، به مقدار ثابت H_0 میل می‌کند. نمودار فاز میدان مغناطیسی، جریان و ارتباط آنها با دما در شکل(۱-۲) نشان داده شده‌است.

۱-۲-۳ اثر مایسنر

تا حدود ۲۰ سال بعد از کشف ابررسانایی توسط اونس و تا قبل از کشف پدیده مایسنر، صفر بودن مقاومت در دماهای کمتر از T_c مشخصه یک ابررسانا به شمار می‌رفت. اما کشف مایسنر و اوکسنفلد در سال ۱۹۳۳ نشان داد که یک ابررسانا فقط یک رسانای کامل نیست بلکه علاوه بر آن دارای خاصیت مهم و لازم دیگری است و آن دیامغناطیس کامل بودن است[۵].

آزمایشات آنها نشان داد که چه در حضور میدان مغناطیسی و چه در غیاب آن اگر دمای فلز به کمتر از دمای گذار کاهش یابد و جسم تبدیل به ابررسانا شود، شار مغناطیسی از ابررسانا رانده می‌شود، حال آنکه در مورد یک رسانای کامل، نفوذ خطوط میدان مغناطیسی به نحوه گذار جسم از حالت عادی به حالت رسانش کامل بستگی دارد.

اگر میدان خارجی B_{ext}، کوچکتر از B_c به ابررسانا اعمال شود، در آن یک جریان ماندگار در جهتی القاء می‌شود که با اثر میدان اعمال شده مخالفت کند (قانون لنز). میدان ناشی از این جریان، B_{ext} را به طور کامل حذف می‌کند و چون این جریان از بین نمی‌رود، میدان مغناطیسی موثر در داخل ابررسانا، B_{int} صفر باقی می‌ماند. جریان ماندگار القایی محدود به یک لایه سطحی با عمق محدود است که در آن میدان خارجی کاملا حذف نمی‌شود اما در داخل این لایه $B_{int}=0$ می‌باشد (شکل ۱-۳الف). اگر میدان خارجی افزایش یابد، وقتی به B_c می‌رسد، جریان‌های ماندگار از بین می‌روند و B_{int} با B_{ext} برابر می‌شود(شکل ۱-۳ب). حال اگر B_{ext} کاهش یابد، هنگامی که میدان دوباره از B_c می‌گذرد، جریان‌های ماندگار یکبار دیگر برقرار می‌شوند، به طوری‌که مانند حالت اولیه $B_{int}=0$ می‌شود و وضعیت به حالت شکل ۱-۳الف برمی‌گردد. این اثر را می‌توان با سرد کردن ابررسانا تا دمای T نیز نشان داد، که در آغاز در میدان B_{ext} و در بالای دمای T_c قرار داد، که در دمای T، B_{ext} با B_c برابر است، در این نقطه میدان به بیرون رانده می‌شود به طوری‌که، مطابق شکل ۱-۳ الف B_{int} برابر صفر می‌شود.



شکل ۱-۳: اثر مایسنر (الف): $T< T_c$ ، (ب): $T>T_c$

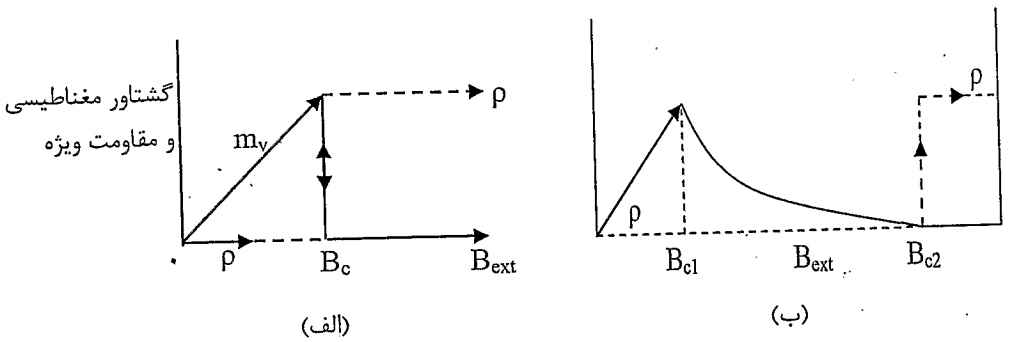
۱-۲-۴ ابررساناهای نوع I و II

ابررساناها را می‌توان، بسته به تغییرات میدان بحرانی B_c و چگونگی گذار از حالت ابررسانش به حالت عادی، به دو گروه ابررساناهای نوع I و II تقسیم کرد.

سازوکار ابررسانش در ابررساناهای نوع I و II هیچگونه اختلافی با یکدیگر ندارند. هر دو نوع ابررسانا درگذار ابررسانا- عادی در میدان مغناطیسی صفر ویژگی‌های گرمایی یکسانی دارند. ولی اثر مایسنر در آنها کاملا متفاوت است. در غیاب میدان مغناطیسی گذار از حالت ابررسانایی به حالت عادی در دمای گذار به صورت ناگهانی اتفاق می‌افتد و بنابراین در این حالت تمام جسم یا در فاز ابررسانایی و یا در فاز عادی خواهد بود. حال آنکه ابررساناها در حضور میدان مغناطیسی خارجی پاسخ‌های متفاوتی نشان می‌دهند. ممکن است در حضور میدان بخش‌هایی از جسم در فاز ابررسانایی و بخش‌های دیگری در فاز عادی باشند. در مواد نوع I ، یک گذار تیز در $B_{ext}=B_c$ به وقوع می‌پیوندد. در اینحالت، گشتاور دیامغناطیسیm_v به صفر افت می‌کند و مقاومت ویژه تا مقدار عادی‌اش افزایش می‌یابد. رفتار نوعI ، رفتار متداول تقریبا تمام عناصر است (شکل ۱-۴الف).

در ابررساناهای نوع II، گذار به حالت عادی، به تدریج صورت می‌گیرد. در این مواد در $B_{ext}=B_{c1}$ ، میدان شروع به نفوذ به داخل ماده می‌کند و m_v رو به کاهش می‌گذارد، لیکن مقاومت به حالت عادی خود برنمی‌گردد؛ گذار تا تحقق یافتن $B_{ext}=B_{c2}$ کامل نمی‌شود. B_{c1} وB_{c2} به ترتیب میدانهای

بحرانی پایینی و بالایی نامیده می‌شوند (شکل ۱-۴ب). در بین آنها، یک حالت آمیخته به وجود می‌آید. این حالت، از رشته‌های عادی در ماده ابررسانا تشکیل می‌شود. فاصله هر زوج الکترون می‌تواند خیلی زیاد باشد، که به آن طول همدوسی، ξ، می‌گویند. اگر $\lambda/\xi > 1$، ابررسانایی نوع I و اگر $\lambda/\xi < 1$، ماده از نوع II است. λ عمق نفوذ لندن است و عبارتست از فاصله‌ای که در آن فاصله دامنه میدان مغناطیسی به $1/e$ مقدار اولیه‌اش در سطح جسم کاهش می‌یابد.



شکل ۱-۴: از بین رفتن خاصیت ابررسانایی توسط یک میدان مغناطیسی[۶]

۱-۲-۵ نفوذ میدان؛ معادلات لندن

قبلا گفتیم که مقدار صفر B_{int} ناشی از جریان‌های سطحی القا شده است که خود میدانی در جهت مخالف با B_{ext} ایجاد می‌کنند (بخش ۱-۱-۲). این جریان‌ها نمی‌توانند در یک لایه سطحی بینهایت نازک جریان یابند. زیرا، در این صورت، از چگالی جریان بحرانی تجاوز می‌کنند، و در نتیجه باید اندکی به داخل ماده گسترش یابند. فقط در زیر این لایه است که اثر جریان‌های سطحی به طور کامل احساس می‌شود، در نتیجه $B_{int} = 0$. در لایه سطحی میدان برابر صفر نخواهد بود و در نتیجه میدان خارجی به طور کامل حذف نمی‌شود. اثر مایسنر و نفوذ میدان را نمی‌توان به تنهایی از معادلات الکترودینامیک ماکسول استنتاج کرد. برادران لندن در سال ۱۹۳۵ یعنی دو سال پس از

کشف اثر مایسنر نشان دادند که برای توضیح خواص مغناطیسی، از دو معادله دیگر نیز باید بهره گرفت[۷]. در حالت رسانای عادی، چگالی جریان j و میدان الکتریکی E توسط قانون اهم ($j=\sigma E$) به هم مربوط می‌شوند که در آن σ هدایت الکتریکی است. به دلیل رسانندگی نامتناهی در حالت ابررسانایی قانون اهم با اولین معادله لندن جانشین می‌شود:

$$\frac{d\vec{j}}{dt}=\frac{\vec{E}}{\mu_o\lambda_L^2} \qquad (۲)$$

که در آن μ_0 نفوذپذیری میدان مغناطیسی فضای تهی و λ_L عمق نفوذ لندن است. برای چگالی جریان‌های ثابت، میدان الکتریکی صفر است. دومین معادله لندن به صورت زیر می‌باشد

$$\nabla\times\vec{j}=-\frac{n_c q_c^2\vec{B}}{m_c} \qquad (۳)$$

رابطه بین چگالی جریان و میدان مغناطیسی را می‌دهد؛ که در آن q_c، n_c و m_c به ترتیب بار الکتریکی، چگالی تعداد و جرم زوج‌های کوپر هستند. این معادله نشان می‌دهد که چگالی شار در داخل ابررسانا به طور نمایی کاهش می‌یابد و در فاصله λ_L به $1/e$ مقدارش در سطح کاهش می‌یابد. بنابراین هر جریانی در ابررسانا باید در نزدیکی سطح و در محدوده عمق نفوذ ابررسانا جاری شود. با افزایش دما چگالی ابرالکترون‌ها کاهش یافته و عمق نفوذ زیاد می‌شود تا زمانیکه جریان در تمام سطح ابررسانا جاری می‌شود و خاصیت ابررسانایی از بین می‌رود.

۱-۲-۶ نظریه BCS

مبانی نظریه BCS در سال ۱۹۵۷ توسط باردین[۲]، کوپر[۳] و شریفر[۴] تدوین گردید[۸]. آنها در یک موفقیت بی‌نظیر در فیزیک بس‌ذره‌ای، مساله ربایش الکترون‌ها را نه فقط برای دو الکترون بلکه برای

---

[۲] J.Bardeen

[۳] L.N.Cooper

[۴] J.R.Shrieffer

همه الکترون‌های رسانش در یک جامد حل نمودند. آنها موفق به ساخت تابع وردشی برای حالت پایه ابررسانا که همبستگیهای بس‌ذره‌ای را به حساب آورده بود شدند و نشان دادند که حالت پایه از نوار برانگیختگی تک‌ذره‌ها با یک گاف انرژی جدا می‌شود.

عبور الکترون از داخل شبکه‌ی بلوری باعث ایجاد برهم‌کنش جاذبه‌ای بین الکترون و یونهای مثبت در اطرافش می‌شود. در نتیجه شبکه‌ی بلوری در آن مکان دچار اغتشاش می‌شود و تمرکز بار مثبت در اطراف الکترون مزبور بوجود می‌آید (شکل۱-۵). حال اگر در زمان مناسب الکترون دیگری ظاهر شود، از نظر این الکترون، شبکه به مقدار کمی پلاریزه بوده و به علت تمرکز بار مثبت در اطراف الکترون اول برهم‌کنش جاذبه‌ای بین دو الکترون بوجود خواهد آمد. در واقع می‌توان گفت که دو الکترون به کمک فونون به مبادله اندازه حرکت می‌پردازند. بر اساس قانون پایستگی اندازه حرکت، مقدار اندازه حرکت کل در یک برخورد، ثابت است و حال آنکه اندازه حرکت هر یک از دو ذره شرکت کننده در عمل برخورد می‌تواند تغییر کند.

ارتعاشات شبکه که منجر به ایجاد مقاومت الکتریکی می‌شوند، حاصل انرژی گرمایی شبکه بوده و به فونونهای گرمایی شهرت دارند. این فونونها به طور تصادفی بوجود می‌آیند و همچنین به طور تصادفی با الکترونهای دیگر برخورد می‌کنند و باعث انتقال اندازه حرکت به آنها می‌شوند. در پدیده ابررسانایی فونونهای شرکت کننده حاصل ارتعاشات گرمایی شبکه نمی‌باشند، بلکه حاصل پدیده‌های زودگذری هستند که باعث برهم‌کنش جاذبه‌ای الکترون _ الکترون می‌شوند. به این فونونها، فونونهای ذاتی یا حقیقی می‌گویند. اگرچه هر دو نوع فونون حاصل ارتعاش یونها هستند، ولی اختلاف آنها در چگونگی ایجاد و زمان گسیل آنهاست.

نتیجه کلی گسیل و جذب فونون، ایجاد یک برهم‌کنش جاذبه‌ای ضعیف بین دو الکترون است. با توجه به اینکه بار هر دو الکترون منفی است، برای اینکه دو الکترون یکدیگر را جذب کنند، باید نیروی حاصل از برهم‌کنش جاذبه‌ای بیشتر از نیروی حاصل از برهم‌کنش دافعه‌ای کولمبی باشند. در سال ۱۹۵۶ باردین و همکارانش [۸] تلاش نمودند که حالت ابررسانایی را توجیه نمایند. آنها نشان

دادند در شرایطی که برهم‌کنش جاذبه‌ای بین الکترونها به وجود می‌آید، دریای فرمی ناپایدار است و در نتیجه برای رسیدن به حالت تعادل، تعداد زیادی زوج کوپر تشکیل می‌شود به طوری که انرژی کل سیستم نسبت به قبل از تشکیل زوج کوپر کاهش می‌یابد. در واقع هر دو الکترون با انرژی کمتر از انرژی فرمی و با بردار اندازه حرکت مساوی و مختلف‌الجهت ($\vec{P}$ ، $-\vec{P}$)، با جذب انرژی به حالات انرژی خالی، در بالای تراز فرمی پراکنده شده و سپس به علت برهم‌کنش جاذبه‌ای که بین آنها به وجود می‌آید تشکیل یک زوج کوپر می‌دهند و در اثر این عمل یک فونون گسیل خواهد شد.

با تشکیل زوجهای کوپر به تدریج از تعداد حالات انرژی خالی نزدیک تراز فرمی کاسته شده و سرانجام تشکیل زوج کوپر متوقف خواهد شد. در دمای صفر کلوین تمام الکترونهای رسانش تشکیل زوج کوپر می‌دهند. به این حالت که سیستم کمترین انرژی را دارد، حالت پایه می‌گویند.

اگرچه به علت ناچیز بودن انرژی پیوندی زوجهای کوپر، پیوند بین دو الکترون هر زوج کوپر در اثر جذب انرژی گرمایی از محیط مرتبا شکسته می‌شود، اما در حالت تعادل و در دماهای کمتر از T_c، به علت تشکیل زوجهای جدید، تعداد زوجهای کوپر ثابت خواهد بود.

به این ترتیب نشان داده‌شد که گذار به حالت ابررسانشی با شرکت الکترونها برای پایین بردن انرژی سیستم رخ می‌دهد. این گذار از چگالش جفتهای منفرد ناشی نمی‌شود، بلکه از چگالش میلیاردها جفت الکترون با همبستگی قوی پدید می‌آید. اگر الکترونها فقط دوبه‌دو جفت شده‌بودند، آن وقت گذار در دمای گذار تیز نبود. وقتی یک جفت چگالیده شود، وضعیت برای چگالش میلیاردها جفت دیگر مناسب می‌شود که این جفت اخیر نیز به نوبه خود زمینه را برای جفتهای دیگر آماده می‌کند. یعنی به طور هم زمان الکترونها به کمک هم چگالیده می‌شوند و به حالت انرژی پایینتری می‌روند.

نظریه BCS همه پدیده‌های ابررساناییی در ابررساناهای با زوج‌شدگی ضعیف را به خوبی توجیه می‌کند.